



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Interés técnico-económico de vías sobre placa de hormigón en líneas españolas de alta velocidad

Trabajo realizado por:

Ariadna Mir Bergadà

Dirigido por:

Andrés López Pita

Máster en:

Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

Barcelona, 12 de junio de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

Al Profesor Andrés López Pita por guiarme y aconsejarme durante el desarrollo del presente trabajo.

También a mis amigos, por hacer más fáciles los días de estudio y por todos los momentos compartidos durante estos años de universidad.

Por último, a mi familia, por apoyarme siempre en todo lo que me he propuesto.

Resumen

La tipología de vía que se ha usado en las líneas de alta velocidad en España desde su concepción es la vía sobre balasto. La elasticidad, el amortiguamiento o bien la capacidad de repartir las cargas son propiedades de este material que han permitido circulaciones a grandes velocidades. Además, el deterioro de las vías es fácilmente reparable mediante operaciones como el bateo del balasto.

Sin embargo, ante la tendencia creciente en cuanto a velocidad y la presencia cada vez mayor de túneles y puentes en los trazados, la vía sobre placa de hormigón tiene cada vez más presencia en la alta velocidad. De hecho, países como Japón y Alemania llevan tiempo implantando dicha tecnología en gran parte de las líneas de su red de alta velocidad.

La vía en placa es un sistema cuya principal ventaja es el reducido mantenimiento que requiere y consecuentemente la disminución de los costes asociados a estas operaciones. También permite reducir el espesor de la superestructura siendo pues un sistema óptimo para puentes y túneles, ya que permite aligerar los tableros y reducir los volúmenes de excavación respectivamente. No obstante, las principales reticencias que se generan en torno a este sistema hacen referencia a la elevada inversión inicial y a su dificultad de ejecución.

Hasta el momento, la vía en placa se ha considerado en España un sistema con aplicación tan solo a túneles, puentes y estaciones pero con la construcción de la línea conocida como la “Y vasca”, caracterizada por la presencia de un elevado número de puentes y túneles a lo largo de su trazado, se plantea la posibilidad de implantarla en la totalidad de su recorrido.

En la actualidad, existen multitud de diseños de sistemas sin balasto por lo que para valorar desde un punto de vista técnico dicha solución constructiva se analizan las ventajas e inconvenientes que cada uno de ellos ofrece. Se realiza también un primer análisis de viabilidad económica teniendo en cuenta los costes de construcción y de mantenimiento, tanto de la vía en placa como de la vía sobre balasto.

Las conclusiones de estos análisis apuntan a una mayor rentabilidad a largo plazo de la solución de vía sobre placa y hacen por tanto necesaria la inclusión de esta opción desde los primeros estudios de la línea a construir. Además, permiten constatar que los elevados costes de inversión asociados a la construcción de la vía en placa son compensados con el paso de los años por unos costes de mantenimiento reducidos.

De esta forma, se abre la posibilidad hacia una nueva concepción de la superestructura en las nuevas líneas de alta velocidad en España que permitirá el alcance de mayores velocidades y la construcción de líneas sujetas a condicionantes orográficos complicados, implicando menores costes que los requeridos hasta el momento.

Palabras clave: vía en placa, análisis técnico-económico, Y vasca

Abstract

The type of track that has been used in the Spain's high-speed lines since the beginning is the ballasted track. The elasticity, damping and capacity to distribute loads are properties of this material that have allowed travel at high speeds. Moreover, it is easy to repair the damage caused to the tracks by means of operations such as ballast tamping.

However, taking into account the growing trend in terms of speed and the increasing presence of tunnels and bridges in rail tracks, slab track is increasing in popularity in high speed networks. In fact, countries like Japan or Germany have been implementing this technology in most of their high speed lines.

Slab track is a system whose main advantage is the reduced maintenance required and consequently the decrease in total cost related to these activities. It also allows a reduction in the thickness of the superstructure, thus being an optimal system to be used in bridges and tunnels, since it allows lightening the deck and reducing the excavation volumes respectively. However, there is a great reluctance to using this system due to its high initial investment and its difficulty of execution

So far, slab track is being considered in Spain as a system whose use is limited to tunnels, bridges and stations. Nevertheless, with the future construction of the high speed line known as "Y vasca" which is characterized by a great number of bridges and tunnels along its track, it is possible to consider its implementation in the whole track.

Nowadays, there are many different types of ballastless track systems, so in order to evaluate this alternative from a technical point of view, the advantages and disadvantages of all of them are analyzed. An initial feasibility analysis is also carried out taking into account construction and maintenance cost from ballast and ballastless track.

The conclusions of these analyses point to a higher long-term profitability of the slab track system alternative and therefore make it necessary to include this option from the first studies of the projected line. In addition, they allow us to verify that the high investment costs associated with the construction of the slab track are compensated by reduced maintenance costs during the whole life span of the line.

This opens up the possibility of a new design of superstructure for the new high-speed lines in Spain which will allow trains to reach higher velocities and also to construct lines where terrain conditions are difficult, implying lower costs than those required until now.

Keywords: slab track, technical and economic analysis, Y vasca

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Índice de figuras	7
Índice de tablas.....	10
1. Introducción.....	11
2. Objetivo y alcance del trabajo	12
3. La vía sobre balasto en líneas convencionales	15
3.1. Referencia histórica sobre la vía.....	15
3.2. Definición y componentes de la vía sobre balasto	16
3.3. Justificación del uso del balasto.....	18
4. La vía sobre balasto en líneas de alta velocidad en Europa	23
4.1. Evolución de la velocidad máxima de circulación	23
4.2. Adaptación de las características técnicas para la alta velocidad	24
5. Características del tráfico de las líneas de alta velocidad.....	30
6. La vía sobre placa de hormigón	33
6.1. Definición y componentes de la vía en placa	33
6.2. Motivación de la vía en placa.....	34
7. Tramos excepcionales con vía sobre placa de hormigón	36
7.1. La vía en placa en túneles	36
7.2. La vía en placa en puentes.....	37
7.3. La vía en placa en estaciones e inmediaciones urbanas	40
8. La utilización de la vía en placa en Japón	42
9. Posible interés de vía sobre placa en una línea de alta velocidad en España	46
9.1. La utilización de la vía en placa en España	46
9.2. ¿Qué es la Y vasca?	48
9.3. Características de la línea	50
10. Análisis técnico de la vía sobre placa.....	53
10.1. Comparación entre ambos sistemas de vía.....	53
10.2. Tipologías de vía en placa	59
10.2.1. Sistemas de carril embebido	59
10.2.2. Sistemas de carril enchaquetado	63
10.2.3. Sistemas de traviesas o bloques hormigonados	65
10.2.4. Sistemas de traviesas o bloques sobre hormigón o asfalto	75

10.2.5.	Sistemas de losas prefabricadas.....	83
10.2.6.	Sistemas monolíticos	90
10.3.	Experiencia disponible a nivel mundial sobre la utilización de vía en placa.....	97
10.3.1.	Japón	98
10.3.2.	Alemania	99
10.3.3.	Taiwan	102
10.3.4.	China	104
10.3.5.	Corea del Sur	106
10.3.6.	Italia	107
10.3.7.	Bélgica	108
11.	Selección de la tipología de vía en placa para el caso español	110
12.	Análisis económico de la solución escogida	119
12.1.	Metodología de cálculo	119
12.2.	Revisión bibliográfica de estudios anteriores.....	120
12.3.	Datos e hipótesis consideradas.....	124
12.4.	Resultados obtenidos.....	125
13.	Conclusiones.....	128
14.	Recomendaciones	131
15.	Bibliografía	132
15.1.	Otra bibliografía.....	135
Anejo I.	Cálculos del análisis económico	137

Índice de figuras

Figura 1: Vía original de la línea Stockton-Darlington.....	15
Figura 2: Sección tipo de ferrocarril	17
Figura 3: Elementos de la vía en el tramo de alta velocidad Madrid-Alicante	18
Figura 4: Huso granulométrico del balasto.....	19
Figura 5: Máquina bateadora tipo	21
Figura 6: Mapa con las máximas velocidades alcanzadas en la red española.....	21
Figura 7: Deterioro de la vía después del ensayo de velocidad en las Landas	23
Figura 8: Solicitaciones en función del peso no suspendido y suspendido obtenidas en las Landas	24
Figura 9: Esquema de traviesas RS y monobloque de hormigón.....	27
Figura 10: Principales diferencias entre líneas de alta velocidad y convencionales.	29
Figura 11: Ecuación fundamental de la planificación.....	30
Figura 12: Evolución del tráfico de viajeros en la línea Tokaido	30
Figura 13: Tráfico de viajeros en las principales redes de alta velocidad en el mundo	32
Figura 14: Sección tipo de vía en placa con o sin traviesas	33
Figura 15: Tendencia general de la evolución de los costes de explotación y construcción entre la vía sobre balasto y sobre placa	35
Figura 16: Diferencia en el volumen de excavación entre ambos sistemas de vía	36
Figura 17: Sección tipo de vía en placa en un puente.....	38
Figura 18: Sección de puente de longitud menor de 25 m	39
Figura 19: Sección de puente de longitud mayor de 25 m	40
Figura 20: Esquema de transmisión de ruido y vibraciones del ferrocarril.....	41
Figura 21: Crecimiento en la circulación de trenes en la línea Tokio-Osaka	42
Figura 22: Ceremonia de inauguración en Tokio el 1 de octubre de 1964.....	42
Figura 23: Proporción de balasto y vía en placa en las líneas japonesas.....	44
Figura 24: Comparación de los costes de mantenimiento entre líneas de balasto y vía en placa.....	45
Figura 25: Perspectiva de la estación de Calatorao	46
Figura 26: Pruebas de vía en placa en Medina del Campo	47
Figura 27: Montaje de vía entre La Sagrera y Mollet del Vallès	48
Figura 28: Longitud de vía de alta velocidad por millón de habitantes en distintos países	49
Figura 29: Mapa de las líneas de alta velocidad en España.....	49
Figura 30: Recorrido Y vasca.....	50
Figura 31: Movilidad por modo de transporte en el País Vasco	51
Figura 32: Previsión de viajeros, trenes y frecuencias de la Y vasca	51
Figura 33: Comparación entre los sistemas de vía	54
Figura 34: Esquema del sistema de carril embebido.....	60
Figura 35: Sección de vía con sistema Edilon utilizada en la estación de Toledo	60
Figura 36: Detalle de los componentes del sistema Edilon	61
Figura 37: Sistema BBERS en Medina del campo	62
Figura 38: Sección tipo y componentes del sistema BBERS.....	63
Figura 39: Sección tipo de carril enchaquetado	64
Figura 40: Proceso de hormigonado donde se aprecian los pórticos de nivelación.....	64
Figura 41: Esquema de sistema de bloques/ traviesas hormigonados.....	65
Figura 42: Evolución del sistema Rheda antes de llegar al actual.....	66

Figura 43: Proceso constructivo de regulación del ancho de vía y peralte	67
Figura 44: Sección tipo Rheda 2000	67
Figura 45: Sección tipo Züblin.....	68
Figura 46: Hormigonado y posicionamiento de traviesas	69
Figura 47: Esquema del sistema Stedef.....	70
Figura 48: Proceso constructivo del sistema Stedef.....	70
Figura 49: Componentes del sistema Sonnevile-LVT.....	72
Figura 50: Proceso constructivo por el método “top-down”	72
Figura 51: Sección tipo Heitkamp	74
Figura 52: Sección de túnel con el sistema WALO	75
Figura 53: Sistemas con bloques o traviesas sobre hormigón o asfalto	75
Figura 54: Sección tipo ATD	76
Figura 55: Procedimiento de sellado con elastómero.....	76
Figura 56: Esquema de sección tipo BTB	77
Figura 57: Perno de anclaje del sistema BTB	78
Figura 58: Transición entre vía sobre balasto y el sistema SATO	79
Figura 59: Sección tipo sistema SATO	79
Figura 60: Sección tipo FFYS	80
Figura 61: Diseño de las traviesas en Y.....	80
Figura 62: Sección tipo Getrac.....	81
Figura 63: Cilindro de anclaje y hueco en la capa de asfalto.....	82
Figura 64: Sección tipo WALTER.....	83
Figura 65: Esquema de sistema de losas prefabricadas	84
Figura 66: Esquema de la placa Shinkansen	84
Figura 67: Detalle del cilindro de fijación.....	85
Figura 68: Sistema Shinkansen con losa aligerada.....	85
Figura 69: Sección Bögl y detalle de los husillos.....	86
Figura 70: Componentes del sistema Bögl.....	87
Figura 71: Etapas del proceso constructivo del sistema Bögl.....	87
Figura 72: Sección tipo ÖBB-Porr	88
Figura 73: Proceso constructivo del sistema ÖBB-Porr.....	89
Figura 74: Esquema del sistema IPA	90
Figura 75: Esquema de sistema monolítico	91
Figura 76: Sección tipo del sistema Rasengleis	91
Figura 77: Sección tipo FFC Crailsheim.....	92
Figura 78: Sección tipo del sistema Hochtief/Shreck-Mives/Longo	93
Figura 79: Resultado final del sistema Hochtief/Shreck-Mives/Longo	94
Figura 80: Sección tipo del sistema BES	95
Figura 81: Sección tipo del sistema BTE.....	95
Figura 82: Detalle del anclaje del carril en el sistema PACT	96
Figura 83: Sección tipo del sistema PACT	96
Figura 84: Porcentaje de túneles y viaductos en las líneas japonesas	98
Figura 85: Líneas de alta velocidad en Japón.....	99
Figura 86: Estación de Rheda-Weidenbrück 1972.....	100
Figura 87: Evolución de la vía en placa en Alemania.....	101
Figura 88: Distribución vía en placa en las líneas alemanas	101
Figura 89: Red de ferrocarriles alemanes	102
Figura 90: Recorrido de la línea de alta velocidad en Taiwan	103

Figura 91: Evolución de la red ferroviaria de alta velocidad en China	104
Figura 92: Red de alta velocidad en China	105
Figura 93: Red de alta velocidad en Corea del Sur.....	106
Figura 94: Diseño de la típica sección de los ferrocarriles italianos.....	107
Figura 95: Red de alta velocidad en Italia	108
Figura 96: Red de alta velocidad en Bélgica	108
Figura 97: Rendimientos de construcción de los distintos sistemas de la vía en placa	111
Figura 98: Comparación de las vibraciones producidas por distintos sistemas en un túnel.....	112
Figura 99: Altura de la superestructura de diferentes sistemas de vía en placa	114
Figura 100: Esquema de los elementos considerados en el análisis económico.....	119
Figura 101: Costes anuales en €/m de tipologías de vía según el análisis realizado por Esveld.....	121
Figura 102: Resultados del análisis realizado por Zoeteman	122
Figura 103: Rombo de decisión del sistema de vía según coste por km de vía y tráfico	123
Figura 104: Evolución de los costes de ambos sistemas	125
Figura 105: Evolución de los costes en los tres escenarios considerados	126
Figura 106: Análisis de sensibilidad	127

Índice de tablas

Tabla 1: Función y características del balasto	20
Tabla 2: Defectos admisibles de nivelación longitudinal.....	26
Tabla 3: Momentos de inercia y dimensiones de los carriles UIC 54 y 60	26
Tabla 4: Rigidez vertical de la placa de asiento de algunas líneas europeas	28
Tabla 5: Tráfico de viajeros en líneas francesas de alta velocidad.....	31
Tabla 6: Costes de construcción de algunas líneas de alta velocidad	34
Tabla 7: Características de las primeras líneas de alta velocidad japonesas	44
Tabla 8: Parámetros comparativos entre la vía en placa y con balasto.....	58
Tabla 9: Clasificación de los sistemas de vía en placa.....	59
Tabla 10: Tecnologías procedentes de otros países aplicadas en China	104
Tabla 11: Principales líneas de alta velocidad sin balasto en China.....	105
Tabla 12: Rigidez a flexión de los sistemas de vía en placa.....	113
Tabla 13: Presencia de los distintos tipos de vía en placa en el mundo	116
Tabla 14: Longitud por sistema de vía en placa en el mundo.....	117
Tabla 15: Escenarios considerados para el análisis económico.....	124
Tabla 16: Operaciones consideradas en el escenario 1	124
Tabla 17: Operaciones consideradas en el escenario 2.....	124

1. Introducción

El crecimiento económico experimentado a finales del siglo pasado en Europa evidenció un incremento importante de la demanda de transporte entre las principales ciudades en expansión. No obstante, la distribución de viajeros entre los distintos modos de transporte evolucionó de forma diversa, y por lo que al ferrocarril respecta su presencia no fue muy destacada hasta la llegada de la alta velocidad.

Esta renovación del concepto del ferrocarril ha mostrado que tiene potencial suficiente para competir con el transporte por carretera e incluso con el aéreo. La importante reducción de los tiempos de viaje ha convertido al ferrocarril en el modo de transporte elegido por gran parte de la sociedad, que considera este ahorro en el tiempo un factor decisivo.

Cuando se habla del ferrocarril, debe recordarse que se trata de un medio de transporte guiado a través de carriles y que por lo tanto necesita de una infraestructura propia que de forma sucinta suele describirse como un emparrillado formado por carril, traviesas y sujeciones que se apoyan en un lecho elástico constituido por balasto.

De hecho, desde prácticamente su concepción, el balasto ha estado presente en todas las vías del mundo pero el aumento de la velocidad de circulación y la dificultad de poder mantener la calidad geométrica, sobre todo en túneles, han propiciado la introducción de un nuevo concepto de superestructura, la vía en placa.

La vía en placa es un sistema capaz de hacer frente a las exigencias de la alta velocidad y a la creciente densidad de tráfico, por lo que países como Japón o Alemania vienen empleando desde hace años dicha tecnología en sus líneas de alta velocidad.

Actualmente se concibe ya como una alternativa al balasto debido al menor mantenimiento exigido gracias a la rigidez de la plataforma y precisión con la que se ejecuta. Sin embargo, la tipología de vía usada en las líneas de alta velocidad en España ha sido siempre la vía con balasto, limitando el uso de la vía en placa generalmente a túneles o estaciones.

Con la Y vasca, la nueva línea de alta velocidad del País Vasco, cuyo trazado se caracteriza por la presencia de multitud de túneles y viaductos, se abre la posibilidad de implantación de esta tipología de vía que requiere su inclusión desde los primeros estadios de planificación con estudios de viabilidad técnica y económica.

Sirva pues el presente trabajo como estudio preliminar y guía para valorar el interés de la aplicación de la vía sobre placa de hormigón en las líneas de alta velocidad española, en concreto para la línea de conexión del País Vasco. Se abordará el tema haciendo una revisión del estado en el que se encuentra el uso de dicho sistema en los distintos países para, posteriormente, estudiar sus características técnicas y realizar un primer análisis económico que permita conocer los órdenes de magnitud y comportamiento de sus costes como base para posteriores estudios más específicos.

2. Objetivo y alcance del trabajo

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un análisis técnico y económico de la vía en placa con motivo de la construcción de la nueva línea de alta velocidad en el País Vasco, conocida popularmente como la Y vasca.

Primeramente, se quiere poner en contexto al lector mediante un repaso de los sistemas de vía usados desde la concepción de la primera línea ferroviaria hasta llegar a la alta velocidad, con el objetivo de presentar las tendencias actuales y los problemas asociados al incremento de la velocidad de circulación que derivan en la creciente introducción de sistemas alternativos al balasto.

Se pretende pues determinar las propiedades de los diferentes sistemas de vía en placa disponibles actualmente a nivel mundial para identificar así la tipología de vía en placa que mejor se adaptaría a la línea teniendo en cuenta condicionantes principalmente técnicos y geográficos. Para ello, se presentará la evolución de la vía en placa desde sus inicios hasta las experiencias actuales con el objetivo de determinar los puntos fuertes y débiles de cada sistema. Finalmente, se realizará también un estudio económico de la solución de vía en placa escogida y se comparará con el sistema habitual sobre balasto.

El presente trabajo se divide en los apartados que se muestran a continuación que, acompañados de una breve descripción de su contenido, tienen la intención de facilitar al lector la comprensión de los distintos argumentos que se exponen hasta alcanzar el objetivo descrito.

El apartado 3, **La vía sobre balasto en líneas convencionales**, es una introducción al sistema de vía habitual en las líneas ferroviarias. Primeramente, se hace un repaso histórico de la evolución de los elementos y sistemas utilizados desde la apertura de la primera línea ferroviaria entre Stockton y Darlington en 1825. También se incluye una descripción somera de la vía sobre balasto y se presentan las principales propiedades que lo han convertido en un sistema aplicado de forma exitosa en las líneas de ferrocarril de todo el mundo.

A continuación el apartado 4, **La vía sobre balasto en líneas de alta velocidad en Europa**, describe la evolución de las características técnicas de la vía sobre balasto para adaptarse a la alta velocidad. Se presentan las modificaciones principales a realizar sobre el sistema de vía para poder satisfacer las exigencias que conlleva la alta velocidad. En este capítulo se presentan también aspectos claves como la rigidez de la vía o la reducción del peso no suspendido, los cuales resultan influyentes en las sollicitaciones y condicionan el diseño de la vía.

Después, en el apartado 5 **Características de tráfico de las líneas de alta velocidad**, se pretende mostrar la relevancia de la demanda de viajeros en el diseño y tipo de explotación de la línea. Se presentan por una parte los casos de Japón y China, países con los mayores volúmenes de tráfico. Por otra parte, se presentan también las cifras de los principales países europeos y por supuesto de España.

Es en este punto que, en el apartado 6 **La vía sobre placa de hormigón**, se aborda la alternativa existente al balasto. Se presenta una descripción de los principales componentes de la vía sobre placa de hormigón y se introducen los motivos por los cuales la vía en placa resulta de interés en la actualidad.

Después de esta exposición, en el apartado 7 **Tramos excepcionales con vía sobre placa de hormigón** se exponen una serie de situaciones en las que la vía en placa resulta el mejor sistema a aplicar. Estas son los puentes, túneles y entornos urbanos. También se presentan las principales ventajas que supone el uso de la vía en placa en estos tramos como por ejemplo la reducción de vibraciones y ruidos, la reducción del peso de los tableros de puentes o el ahorro en la sección a excavar gracias a la reducida altura de los sistemas de vía en placa.

Sin embargo, en este trabajo se pretende estudiar la implantación de la vía en placa en la totalidad de una línea y no solamente en algunas secciones. Es por eso que en el apartado 8, **La utilización de la vía en placa en Japón**, se relata la experiencia de los ferrocarriles japoneses, precursores de este sistema. Se exponen los motivos que les han llevado a implantar la vía en placa en sus líneas de velocidad así como las distintas acciones e innovaciones llevadas a cabo a lo largo de los últimos años.

A partir de las experiencias japonesas y las características de sus líneas se plantea en el siguiente apartado la posibilidad de implantar la vía en placa en la Y vasca. Así pues en el apartado 9, **Posible interés de vía sobre placa en una línea de alta velocidad en España**, se presenta la situación actual de la alta velocidad española haciendo especial énfasis en las experiencias en tramos donde se ha aplicado la vía en placa como el túnel de Guadarrama o la estación de Atocha, entre otros ejemplos. Se presenta la futura línea de alta velocidad del País Vasco y se exponen las características de la línea que intervienen en su planificación como la demanda de viajeros o los condicionantes orográficos, con el objetivo de determinar más adelante si se reúnen las condiciones para la implantación de un sistema de vía en placa.

En el apartado 10 **Interés técnico de la vía sobre placa**, se analizan las características técnicas de la vía en placa mediante una comparación con el sistema sobre balasto. Una vez finalizado, se explican las distintas tipologías de vía en placa y se plantean los puntos fuertes y débiles de cada una de ellas con objeto de conocer el comportamiento y determinar la aplicabilidad en la línea de estudio. En este apartado se incluye también un recopilatorio de las experiencias en el uso de la vía en placa a nivel mundial.

A partir de las tipologías estudiadas y de sus características, en el apartado 11 **Recomendaciones técnicas** se pueden presentar los criterios para evaluar la idoneidad de las tipologías de vía en placa planteadas. De esta manera se determina el mejor sistema para posteriormente evaluarlo desde un punto de vista económico.

Es en el apartado 12, **Análisis económico de la solución escogida**, donde se realiza un estudio de viabilidad de la tipología seleccionada. Aquí se incluye la metodología de estudio basada en el uso del indicador VAN. También se detallan las situaciones e hipótesis asumidas así como, estudios anteriores de distintos autores en el ámbito de los costes de implantación y mantenimiento de la vía en placa. Para finalizar el apartado se muestran los resultados obtenidos.

Finalmente, en los últimos apartados se contextualizan los argumentos presentados a lo largo del trabajo y se extraen las principales conclusiones. También se presentan una serie de recomendaciones en base a los análisis económicos y técnicos planteados.

3. La vía sobre balasto en líneas convencionales

3.1. Referencia histórica sobre la vía

Es un hecho bien conocido que, desde las primeras ideas sobre la implementación práctica de un sistema guiado de transporte, pasaron siglos hasta la inauguración de la primera línea de ferrocarril entre Stockton y Darlington en 1825.

Al realizar investigaciones arqueológicas en Egipto, Grecia e Italia entre otros países, se pudo ver que se habían realizado surcos en las piedras para la circulación de carretas con tracción animal.

Más adelante, a partir del siglo XV, cobraron importancia las vías en las minas. El laboreo minero resultaba cada vez más complejo ya que se pretendía alcanzar vetas más profundas. Por eso, se introdujeron carros con ruedas que se desplazaban sobre vigas de madera para incrementar el rendimiento que proporcionaba el uso manual de sacos, espuelas, etc. Sin embargo, los carriles de madera tendían a pudrirse por las condiciones existentes en el interior de las minas, así que para solucionarlo más adelante los sustituyeron por carriles de hierro fundido. Es de interés destacar que se trataba de carriles en forma de L que se apoyaban en piedras en lugar de travesaños de madera para soportar los carriles. Este sistema de apoyo de carril se generalizó en las zonas mineras e incluso fue utilizado por G. Stephenson en la línea Stockton-Darlington, como se verá más adelante. (Pita, 2017).

Los carriles con sección en forma de L tenían el inconveniente de la acumulación del polvo y el barro, lo que dificultaba el paso de las ruedas. Para subsanar este problema el ingeniero civil William Jessop construyó en 1789, en Loughborough, una línea de ferrocarril en la que el carril tenía la cara del apoyo plana y la rueda llevaba el reborde en forma de L. Se trató del primer guiado por pestaña que posteriormente acabaría imponiéndose.

Después de estos años de experiencia, se llevó a cabo la línea Stockton-Darlington, la primera vía de ferrocarril en el mundo. El carril que se eligió tenía un peso del orden de 13 kg/ml y se apoyaba sobre piedras tal y como puede observarse en la Figura 1.



Figura 1: Vía original de la línea Stockton-Darlington
Fuente: A. L. Pita (2017)

Este sistema se implantó también en la línea Baltimore-Ohio en Estados Unidos, abierta a la explotación comercial en el año 1830. Esta idea de apoyo discontinuo de los carriles se implantó también en diversas versiones en años posteriores. De hecho, una de ellas fue instalada en la línea Valencia-Tarragona. Consistía en utilizar unos platos de fundición reforzados por unos nervios que servían de apoyo para el carril y tenía también una barra para mantener el paralelismo de los carriles.

Puede pensarse que los diversos sistemas de apoyo del carril respondían todos a la idea de soporte discontinuo. Sin embargo, ya en 1833 Isambard Brunel diseñó una vía para unir Londres con Bristol con soportes longitudinales para los carriles.

Cabe destacar que a mediados del siglo XX los ferrocarriles franceses utilizaron en algunas líneas el sistema de vía conocido como Longrinas Laval. En este sistema los largueros longitudinales estaban contruidos por bloques de hormigón que tenían una anchura de 70 cm y un espesor de 16 cm. El mantenimiento del ancho de vía se lograba mediante elementos metálicos.

Este tipo de vía Laval llegó a colocarse en aproximadamente 150 km de la red francesa de ferrocarriles. Sin embargo, la mayor facilidad de colocación de las traviesas RS y su menor coste impidieron una mayor extensión. De hecho las traviesas RS siguen usándose en la actualidad en líneas convencionales.

No obstante, un elemento importante de la vía es el balasto aunque no siempre ha estado presente en ella. En los inicios del ferrocarril el emparrillado de la vía se soportaba directamente sobre el terreno de sustentación, es decir, las traviesas entraban en contacto directo con el suelo o roca existente a lo largo del itinerario de la línea ferroviaria.

Como es de esperar, con el tiempo y el paso de los trenes este emparrillado se hundía debido a que las cargas superaban la capacidad portante del suelo y además, cuando el terreno estaba constituido por rocas, las traviesas muy fácilmente se rompían debido a la escasa o nula elasticidad que este tipo de terreno ofrece. (Guerrero, 2017)

Con objeto de paliar este hecho, se empezó a introducir una capa de piedras entre las vías y el terreno sobre el que se asentaban, logrando así distribuir de una forma bastante uniforme las cargas producidas por los convoyes. Estas piedras son el conocido balasto, actualmente presente en la mayoría de secciones de vías férreas por sus múltiples cualidades que más adelante se tratarán.

3.2. Definición y componentes de la vía sobre balasto

Este tipo de vía es aquella que se asienta sobre una capa de balasto, constituida por un granulado que amortigua las vibraciones transmitidas a la plataforma y asegura el drenaje y evacuación rápida de las aguas superficiales. (Puebla y Fernández, 2000)

Dicho material se extiende sobre la explanación de una vía férrea para poder asentar y sujetar las traviesas que soportan los carriles. Se presenta en la Figura 2 una sección tipo donde pueden distinguirse los principales elementos que componen dicha tipología así como una breve descripción de cada uno.

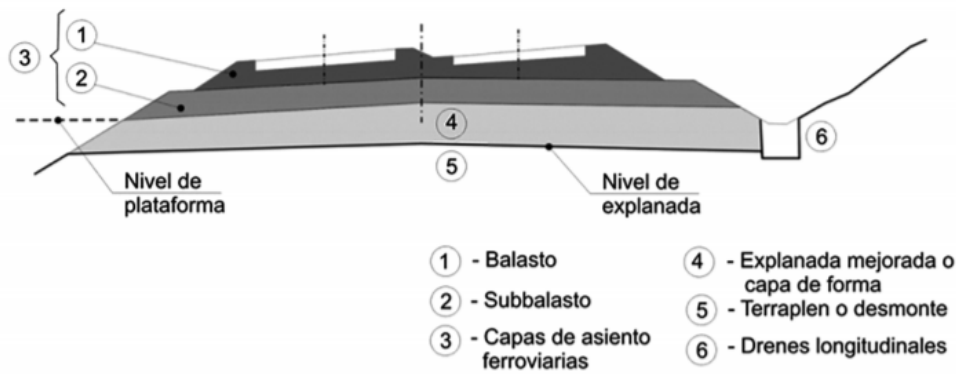


Figura 2: Sección tipo de ferrocarril
Fuente: Ministerio de Fomento (2015)

- Capa de forma. Sirve de asentamiento de la superestructura y está provista de pendientes transversales para la evacuación de aguas pluviales. Se encuentra entre la capa de subbalasto y la parte superior del terraplén o el fondo del desmonte constituyendo así la plataforma. El espesor de esta capa es variable en función de la calidad del material soporte ubicado bajo la misma. El material a utilizar para dicha capa debe cumplir los requerimientos establecidos en la normativa.
- Subbalasto. Se trata de una capa formada por material granular seleccionado con tamaño de partículas de 2 a 30 mm, extendido en capas de 30 cm de espesor, debidamente compactadas sobre las cuales se apoya la capa de balasto. Tiene la función de proteger la plataforma del punzonamiento del balasto, repartir las cargas sobre el terreno e impermeabilizar la plataforma.
- Balasto. Se trata de un material procedente del machaqueo de rocas normalmente silíceas y presenta una granulometría comprendida entre 20 y 60 mm.
- Traviesas. Son elementos transversales al eje de la vía que sirven para mantener unidos y a una distancia fija a los dos carriles que conforman la vía, así como mantenerlos unidos al balasto. Pueden ser monobloque si están formadas por una sola pieza de hormigón armado o bibloque si constan de dos piezas de hormigón unidas por una barra de hierro.
- Sujecciones. Su función principal es mantener unidos carril y traviesa y evitar el vuelco del carril. Para el buen funcionamiento de la sujeción suelen necesitar elementos que garanticen una buena elasticidad de la vía mediante el correcto apoyo y asentamiento del carril sobre ellas, como la placa de asiento.
- Carril. Es el encargado de soportar directamente el peso de los vehículos y las acciones dinámicas generadas por la velocidad. Existen diferentes tipos de carriles dependiendo de su peso por metro lineal. (ADIF, 2007)

En la Figura 3 se muestran los elementos descritos en un tramo real de alta velocidad.



Figura 3: Elementos de la vía en el tramo de alta velocidad Madrid-Alicante
Fuente: ADIF Alta Velocidad

3.3. Justificación del uso del balasto

El balasto es un material granular de tamaño grueso, procedente del machaqueo de rocas normalmente silíceas, que asegura unas prestaciones en cuanto a resistencia a compresión, a desgaste, etc.

El balasto tiene principalmente tres funciones:

1. Dotar a la vía de elasticidad y amortiguamiento, permitiendo deformaciones de la estructura de la vía para reducir la magnitud de las solicitaciones dinámicas ejercidas por los vehículos y además proporcionar una rodadura más confortable.
2. Transmitir las cargas debidamente repartidas disminuyendo el nivel de presiones que lleguen a la superficie de la plataforma. Además, en el caso de contacto con infraestructuras rígidas debe soportar la abrasión que pueden sufrir las partículas.
3. Favorecer el drenaje de la estructura base dada su permeabilidad.

Para poder ofrecer estas funciones, se exige que el balasto cumpla una serie de características.

Por una parte, para poder disminuir las presiones sobre la plataforma y proporcionar elasticidad y amortiguamiento, es necesario disponer de un determinado espesor de balasto. Normalmente esta magnitud se encuentra entre 25 y 30 cm. Si se dispusieran

espesores menores no se podrían garantizar las funciones mencionadas, en cambio la aplicación de valores superiores conllevaría un incremento en el asiento de la vía y previsiblemente el aumento también de los defectos geométricos.

Por otra parte, se exige que el balasto tenga un cierto valor del coeficiente de Deval para poder garantizar la resistencia a la abrasión en infraestructuras como puentes donde las partículas se encuentran en contacto con el hormigón. Con estas exigencias se asegura que el balasto responderá satisfactoriamente a las acciones verticales provocadas por el peso de los vehículos ferroviarios. (Pita, 2006)

Sin embargo, la gran parte de las acciones verticales están provocadas por la circulación de los vehículos. Cuando el eje de un vehículo se desplaza a lo largo de la vía, se producen dos fenómenos simultáneos: una flexión vertical y un levantamiento de una parte delantera de la vía en la dirección del movimiento. El sucesivo golpeteo de las traviesas sobre el balasto, correspondiente a los sucesivos ejes que pasan por una vía, y el cada vez mayor uso de traviesas pesadas pueden ocasionar un rápido deterioro de las partículas del balasto. Se exige, por ello, que este material tenga una determinada resistencia al choque mediante el coeficiente de Los Ángeles.

Por último, el drenaje viene garantizado por la granulometría que presenta el balasto con tamaños de entre 20 y 60 mm tal y como puede observarse en la Figura 4.

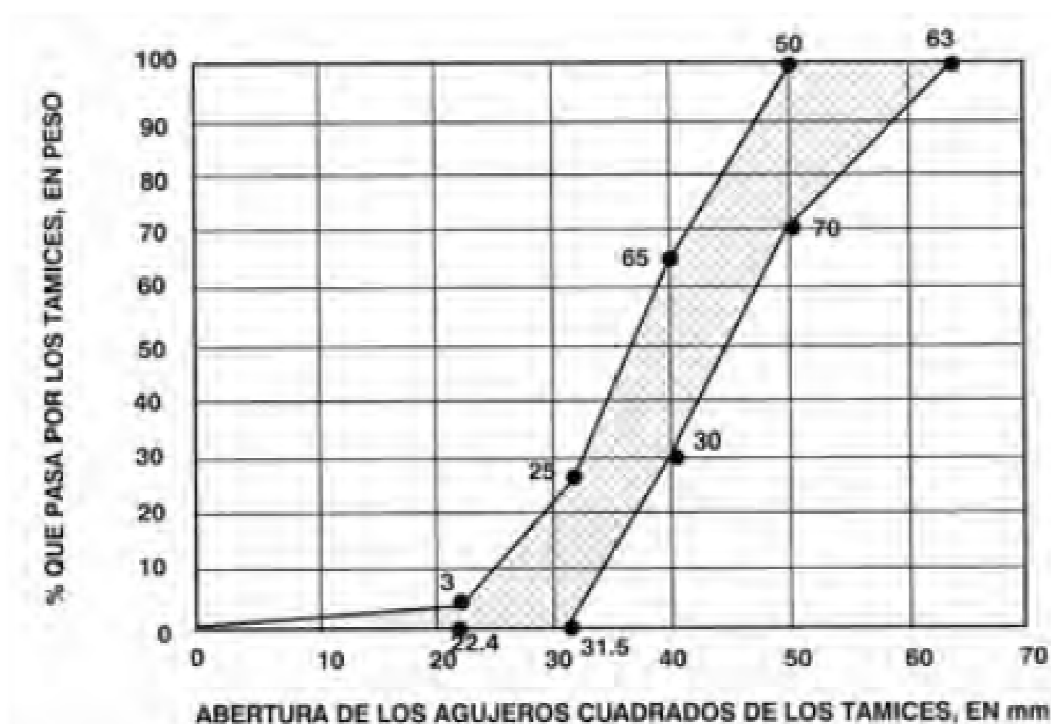


Figura 4: Huso granulométrico del balasto
Fuente: A. L. Pita (2006)

Se presentan de forma resumida en la Tabla 1 las características y funciones mencionadas.

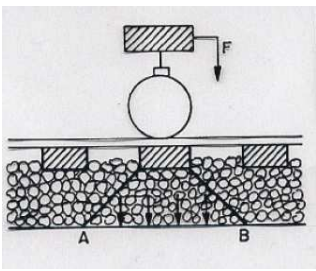
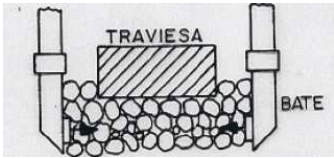
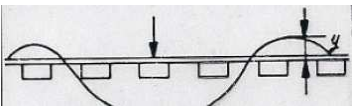
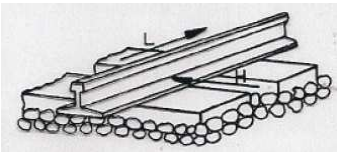
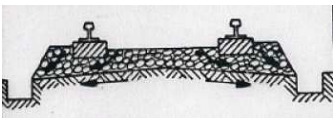
Tipo de acción	Esquema de actuación	Función del balasto	Factor de medida
Acciones verticales		Proporcionar elasticidad y amortiguamiento	Espesor del balasto
		Resistencia a la abrasión	Coefficiente Deval
		Disminución de las presiones sobre la plataforma	Espesor de balasto
		Dimensiones Dureza	Tamaños Granulometría Resistencia a compresión de la roca
		Resistencia al choque	Coefficiente de los Ángeles
Acciones horizontales		Dimensiones Compactación	Tamaños Granulometría
Acciones climáticas		Filtración Resistencia al hielo	Granulometría Resistencia a los sulfatos

Tabla 1: Función y características del balasto
Fuente: A. L. Pita (2006)

Además de todas estas ventajas, no debe olvidarse un aspecto muy importante que es la facilidad de puesta en obra y mantenimiento que ofrece la vía con balasto. Uno de los procedimientos para efectuar el montaje de una vía consiste en colocar inicialmente el emparrillado y hacer circular sobre él los vagones tolvas que descargan el balasto sobre la infraestructura. Posteriormente, para que el balasto proporcione el apoyo requerido a las traviesas es necesario que las partículas se encuentren compactadas, hecho que se obtiene mediante el bateo de la vía. (Pita, 2006)

Dicha operación es también el procedimiento más usado como medida de reparación para el balasto. El bateo de la vía consiste en introducir unos bates en la capa de balasto que realizan un movimiento de cierre de partículas granulares bajo las traviesas. Se trata de una operación que puede llevarse a cabo de forma sencilla y durante la noche evitando así afectación en la circulación de los trenes. Cabe destacar

que se trata de una operación rápida ya que con la maquinaria actual que se muestra en la Figura 5 se obtienen rendimientos de bateo de hasta 2.200 m/hora.



Figura 5: Máquina bateadora tipo
Fuente: Universidad de Cartagena

El conjunto de estas características permitió que la vía con balasto se convirtiera en el sistema por excelencia presente en todas las líneas convencionales de ferrocarril ya que resultaba un sistema con costes de construcción asequibles y con una relativa flexibilidad para reponer sus elementos, corregir su geometría o permitir pequeños ajustes de trazado gracias a operaciones como el bateo.

En España, la primera línea de ferrocarril peninsular se construyó en 1848 entre Barcelona y Mataró, a la que siguió en 1851 la Madrid-Aranjuez que posteriormente se prolongó hasta Albacete. La aprobación de la ley de ferrocarriles en 1855 desencadenó la construcción de más líneas de ferrocarril tal y como se muestra en la Figura 6, hasta que en 1992 surgió la alta velocidad.



Figura 6: Mapa con las máximas velocidades alcanzadas en la red española
Fuente: ADIFAlta Velocidad (2013)

De la imagen se desprende que la máxima velocidad en las líneas convencionales se encuentra entre 160-200 km/h, condiciones bajo las cuales el balasto presenta un excelente resultado. Además, su extendido uso ha permitido disponer de una amplia experiencia en términos de gestión y costes asociados.

4. La vía sobre balasto en líneas de alta velocidad en Europa

4.1. Evolución de la velocidad máxima de circulación

La realidad del sistema ferroviario en el siglo XIX ponía de relieve que los trazados ferroviarios en general no permitían alcanzar velocidades de circulación mantenidas por encima de 160 km/h. Este era uno de los motivos por los cuales el ferrocarril ofrecía unos tiempos de viaje poco competitivos respecto a los otros modos de transporte y en consecuencia, iba perdiendo cuota de mercado. Llegados a ese punto, era necesario introducir cambios en el ferrocarril para invertir la progresiva pérdida de tráfico que sufría. Esos cambios consistían fundamentalmente en construir líneas de alta velocidad como señaló ya el francés Louis Armand: “El futuro del transporte de viajeros por ferrocarril no puede concebirse sin el desarrollo de las altas velocidades”.

Sin embargo, en 1903 tan solo se había conseguido circular a velocidades mayores a 200 km/h, concretamente 210 km/h en tramos de ensayo. Años más tarde, el 28 de marzo de 1955 se alcanzaron en las Landas francesas los 331 km/h de velocidad máxima. Pero cabe destacar que a pesar de batir el record de velocidad en aquel momento, la vía quedó inservible tal y como se puede observar en la Figura 7 y hubo problemas de corriente llegándose a fundir un pantógrafo.



Figura 7: Deterioro de la vía después del ensayo de velocidad en las Landas
Fuente: A. L. Pita (2006)

Después del fracaso de las Landas, los franceses siguieron con sus trabajos de investigación en este ámbito.

En 1967 ya se había experimentado en el campo de velocidades máximas de hasta 250 km/h y, más adelante, se efectuaron circulaciones experimentales a velocidades comprendidas entre 250 y 300 km/h. De esta manera, en el momento de iniciarse la construcción de la primera línea de alta velocidad entre París y Lyon en 1976, ya se

disponía de una notable experiencia a estas velocidades. De hecho, en 1972 el TGV 001, una rama experimental, había circulado en ensayo a 318 km/h.

Los progresos en este ámbito hicieron posible que en febrero de 1981, unos meses antes de abrir a la explotación comercial la nueva línea París–Lyon, el TGV situase el récord mundial en 380 km/h. (Pita, 2014)

Debe destacarse que todos estos ensayos se realizaron en vías sobre balasto demostrando la validez de dicho sistema a altas velocidades.

4.2. Adaptación de las características técnicas para la alta velocidad

Para poder llegar a la primera línea de alta velocidad en Europa no tan solo fueron necesarios ensayos experimentales como los ya mencionados sino que fue necesario estudiar los factores determinantes que hacían factible técnicamente la circulación a altas velocidades.

Cuando tan solo se disponía de conocimientos básicos sobre el comportamiento de la vía frente a los esfuerzos verticales y transversales transmitidos por los vehículos, en la segunda mitad de la década de los años sesenta, los estudios se enfocaron en encontrar mecanismos para reducir el impacto vertical de los vehículos sobre la vía y poder garantizar así la circulación a mayores velocidades.

Del ya mencionado ensayo de las Landas, se obtuvieron los resultados de las sollicitaciones dinámicas verticales en función del peso no suspendido y suspendido, tal y como puede observarse en la Figura 8.

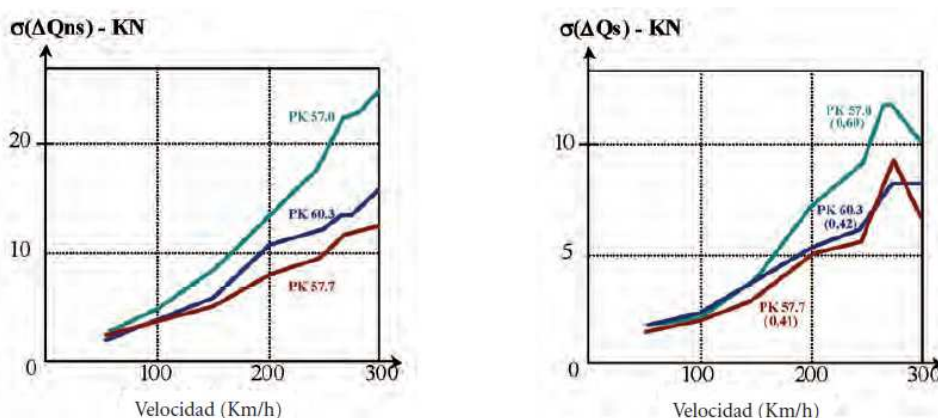


Figura 8: Solicitaciones en función del peso no suspendido y suspendido obtenidas en las Landas
Fuente: A. L. Pita (2006)

A partir de la Figura 8 pueden sacarse dos conclusiones: la primera de ellas es la influencia de la velocidad en los esfuerzos sobre el carril, y la segunda hace referencia a la influencia de los distintos componentes del peso total de un vehículo ferroviario con un papel importante por parte del peso no suspendido.

El peso no suspendido es la parte del peso total de un vehículo que actúa sobre la superficie del carril sin interposición de ningún elemento elástico. Se trata, por tanto, del peso propio del eje, de las ruedas, de los discos de freno y de toda la parte del material que se apoye sobre estos elementos. En cambio, el peso suspendido es la parte del peso material que actúa sobre la superficie del carril por intermedio de algún elemento elástico que reduce su impacto sobre la vía. La caja del vehículo es peso suspendido, pues se apoya en el carril a través de la suspensión primaria y secundaria. (Pita, 2017).

De hecho, los resultados presentados confirmaron la formulación que Prud'Homme presentó en 1970:

$$\Delta Q = a \cdot b \cdot v \cdot \sqrt{m \cdot k} = f(\sqrt{m \cdot k})$$

Donde:

ΔQ representa las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas del material circulante.

$a \approx 0,42$

b es una variable relacionada con los defectos de vía y del vehículo.

v es la velocidad de circulación del vehículo, en km/h.

m es la masa no suspendida por rueda del vehículo, en toneladas.

k es la rigidez vertical de la vía, en t/mm la cual depende de carril, placa de asiento, fijaciones, balasto, subbalasto y plataforma. (Fonseca, 2003)

Esta formulación representó un gran avance e indicaba que para disminuir las solicitaciones en las líneas de alta velocidad hacía falta:

- Reducir el nivel de los defectos admisibles en los carriles.
- Disponer de vías con la menor rigidez vertical posible.
- Disminuir el peso no suspendido de los vehículos.

Estas acciones permitirían incrementar la velocidad de los ferrocarriles y en consecuencia reducir los tiempos de viaje para que este modo volviera a ser competitivo, sin incrementar la agresividad sobre la vía y su deterioro.

Por lo tanto, la tipología de vía sobre balasto empleada en las líneas convencionales tuvo que evolucionar y adaptar sus características para ser introducida a los servicios de alta velocidad.

El principal aspecto a modificar hace referencia a los parámetros geométricos del trazado de la vía. La velocidad de proyecto de una línea determina el valor de los radios mínimos en planta. Por razones de seguridad y confort es necesario limitar el radio inferiormente y asegurarse que la insuficiencia de peralte no supere ciertos límites. Mientras que el radio habitual para las líneas convencionales es de 1.000 m, las líneas de alta velocidad necesitan radios mucho mayores, de 5.000 a 7.000 m para velocidades alrededor de 350 km/h. De forma general, las líneas de alta velocidad requieren de trazados menos sinuosos que las convencionales, sin embargo no debe olvidarse mencionar el cambio del ancho de vía ibérico a internacional para poder salvar las dificultades de conexión con los diferentes países existentes hasta el

momento. Además, el incremento de velocidad conllevó a unas tolerancias más restrictivas en cuanto a los criterios de calidad: alabeo, alineación, nivelación transversal y longitudinal. Se muestran a modo de ejemplo en la Tabla 2 los defectos admisibles en la nivelación longitudinal.

Velocidad [km/h]	Valor máximo [mm]	Desviación típica [mm]
$V < 80$	12	2,3
$80 < V < 120$	8	1,8
$120 < V < 160$	6	1,4
$160 < V < 200$	5	1,2
$200 < V < 300$	4	1,0

Tabla 2: Defectos admisibles de nivelación longitudinal
Fuente: A. L. Pita (2006)

Por lo que a la superestructura se refiere, también son necesarias algunas modificaciones en los elementos que forman parte de la vía para cumplir con las premisas antes mencionadas.

El carril, como elemento sustentador del material rodante, presenta distintos diseños en función de su peso por metro lineal. Los carriles usados en las líneas convencionales suelen ser los UIC 54 los cuales tienen un peso de 54 kg por metro lineal y sus dimensiones se pueden observar en la Tabla 3. En cambio, para las líneas de alta velocidad suelen usarse carriles con mayor peso para aumentar la inercia y obtener una mayor resistencia a la flexión, los UIC 60. El aumento de la velocidad implica un incremento de las solicitaciones y, por lo tanto, el uso de un carril más pesado deriva en un menor coste de mantenimiento ya que reduce la tensión bajo la traviesa.

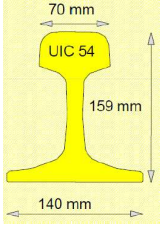
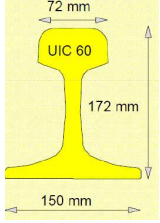
Tipo de carril	Momento de inercia I_x [cm ⁴]
<p>UIC 54</p> 	2.346
<p>UIC 60</p> 	3.055

Tabla 3: Momentos de inercia y dimensiones de los carriles UIC 54 y 60
Fuente: Apuntes de la asignatura de Ferrocarriles

El siguiente elemento que ha tenido que evolucionar para adaptarse a las exigencias de la alta velocidad son las traviesas. Estas tienen la función de reducir las presiones transmitidas a la capa de balasto gracias al área de apoyo sobre la misma y proporcionar también una mayor estabilidad a la vía debido al peso.

La tendencia ha sido aumentar el área de apoyo y el peso para proporcionar una reducción de asentamientos y tensiones. Así pues, se pasó de las traviesas formadas por dos dados de hormigón unidos por una riostra, conocidas como traviesas RS, a las traviesas de hormigón monobloque. Estas últimas tienen la forma análoga a las de madera que se usaban en sus inicios y ofrecen una superficie de apoyo de entre 2400-3.200 cm² frente a los 2.088 cm² de las traviesas RS. Además, su mayor peso contribuye también a un incremento de la resistencia transversal. Pueden observarse las dos tipologías en la Figura 9.

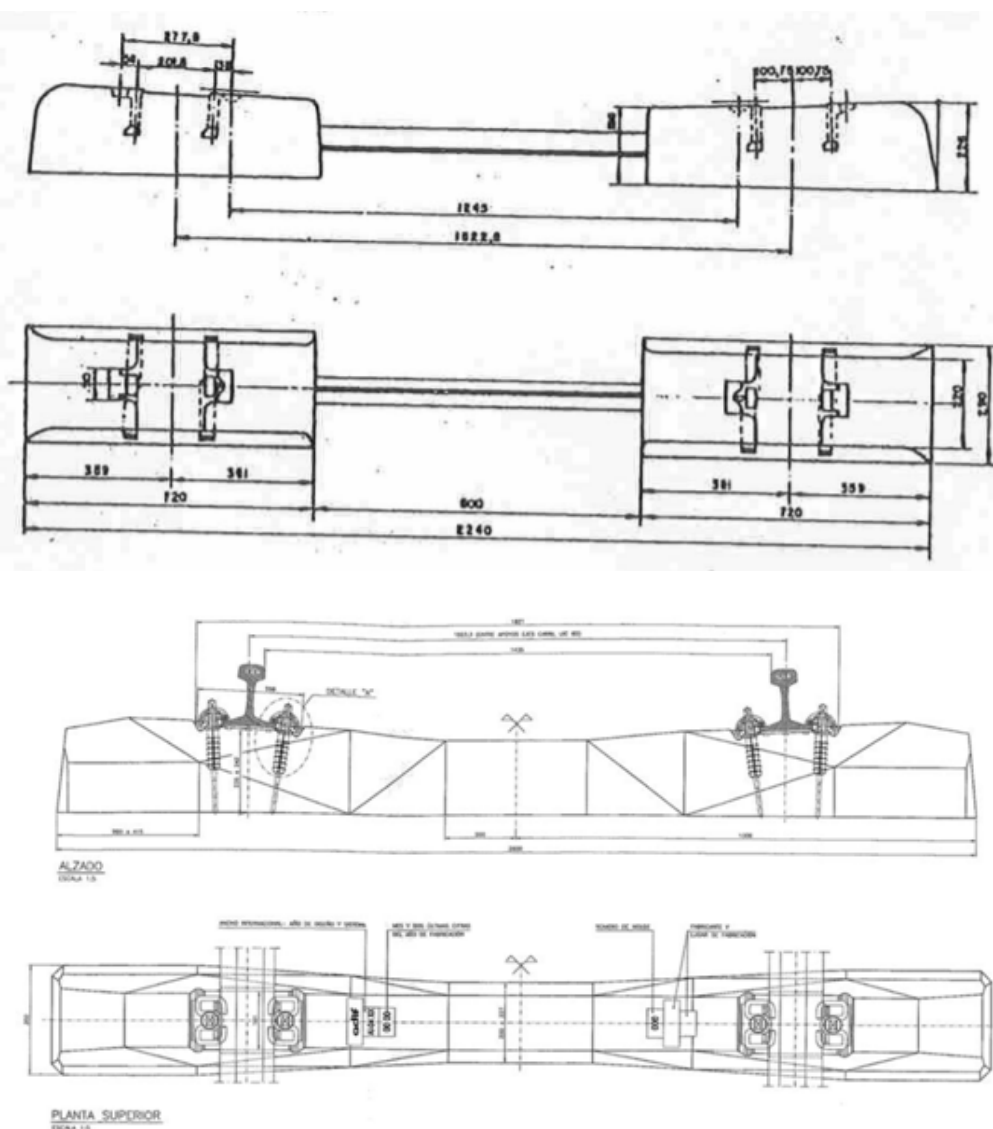


Figura 9: Esquema de traviesas RS y monobloque de hormigón
Fuente: N. Grañón (2003)

Puede decirse pues que las líneas de alta velocidad están dotadas de carriles de mayor rigidez a flexión y traviesas más pesadas y con mayor superficie de apoyo.

No obstante, debe destacarse también un último elemento, la placa de asiento. De hecho, es el elemento que permite modificar la rigidez vertical de la vía, que como ya se ha dicho resulta clave en el ámbito de las sollicitaciones. Además, un valor bajo de rigidez favorece a la disminución de las vibraciones.

Por este motivo con el paso del tiempo se ha ido disminuyendo el valor de la rigidez de aproximadamente 500 kN/mm en las líneas convencionales, a valores entre 60 y 100 kN/mm en las de alta velocidad. Se puede observar en la siguiente Tabla 4 la evolución de las placas de asiento utilizadas en algunas líneas europeas.

País	Línea	Rigidez vertical de la placa de asiento [kN/mm]
Francia	Líneas convencionales	150
	Líneas alta velocidad	90
Alemania	Líneas convencionales	500
	Líneas de alta velocidad:	
	Hannover-Würzburg	500
	Mannheim-Stuttgart	500
	Hannover-Berlín	60
	Contorno de Stendal (línea Hannover- Berlín)	27
España	Líneas alta velocidad:	
	Madrid-Sevilla	500
	Madrid-Barcelona	100
Italia	Líneas alta velocidad	100
Bélgica	Líneas alta velocidad y líneas convencionales	60-100

Tabla 4: Rigidez vertical de la placa de asiento de algunas líneas europeas
Fuente: A. L. Pita (2006)

Por último, destacar que para reducir el peso no suspendido de los vehículos, última premisa mencionada, se introdujeron vehículos con la mitad del peso no suspendido.

Con todo esto quedan patentes las múltiples diferencias existentes entre las vías convencionales y las de alta velocidad. De hecho, en la Figura 10 se muestran los cambios más destacados respecto a las líneas convencionales junto con una breve justificación.

Elemento	Característica	Justificación
Carril	<ul style="list-style-type: none"> – UIC 60 frente a UIC 54 – Defectos verticales de fabricación de 0,3 mm, frente a 1 mm, en longitudes de onda de 1,7 a 1,8 m 	<ul style="list-style-type: none"> – Para reducir los gastos de conservación de la vía – Para disminuir el nivel aceleraciones verticales en caja de grasa de los vehículos
Sujeción	<ul style="list-style-type: none"> – Frecuencia propia superior a 1500 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> – A 300 km/h, la frecuencia de vibración del carril puede ser > 1500 Hz
Placa de asiento	<ul style="list-style-type: none"> – Espesor de 9 mm frente a 4,5 mm – Rigidez vertical de 60 a 100 KN/mm frente a 500 KN/mm 	<ul style="list-style-type: none"> – Para reducir la rigidez vertical de la vía e incrementar la capacidad de amortiguamiento de las vibraciones
Traviesa	<ul style="list-style-type: none"> – Mayor área de apoyo por hilo de carril (2500 a 2800 cm² frente a 2000 cm²) – Mayor peso (300 a 380 kg frente a 180 a 250 kg) 	<ul style="list-style-type: none"> – Disminución del nivel tensional transmitido a la capa de balasto – Incrementar la resistencia de la vía frente a esfuerzos transversales
Balasto	<ul style="list-style-type: none"> – Menores valores del coeficiente Los Angeles (15 a 20 frente a 21 a 25) – Mayor espesor de balasto (30 a 35 cm frente a 20 o 25 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> – Mejorar la resistencia del balasto – Reducir el nivel de tensiones verticales sobre la plataforma e incrementar el amortiguamiento de la vía
Plataforma	<ul style="list-style-type: none"> – Mayor capacidad portante (> E₂) – Tratamiento de la infraestructura de débil capacidad resistente 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducir los asientos diferenciales – Evitar la contaminación de las distintas capas de asiento
Entrevía	<ul style="list-style-type: none"> – Mayor distancia entre ejes de vía (4 a 5 metros) frente a 3,6 o 3,8 m 	<ul style="list-style-type: none"> – Limitar los efectos aerodinámicos durante el cruce de los trenes que afectan al confort de los viajeros
Aparatos de vía	<ul style="list-style-type: none"> – Incorporación de aparatos con corazón móvil 	<ul style="list-style-type: none"> – Mejorar la seguridad de la circulación. – Limitar el incomfort sobre los viajeros

Figura 10: Principales diferencias entre líneas de alta velocidad y convencionales.
Fuente: A. L. Pita (2006)

A pesar de estas diferencias debe destacarse que en ambas tipologías se aplica el sistema de vía sobre balasto que, mediante modificaciones de sus elementos, se muestra flexible y válido ante un amplio abanico de velocidades. Prueba de ello es la gran longitud de líneas de alta velocidad construidas en Europa mediante dicha tecnología para poder solucionar los problemas de falta de competitividad que presentaban muchas de sus líneas.

5. Características del tráfico de las líneas de alta velocidad

La planificación de una línea ferroviaria conlleva un exhaustivo análisis de toda la información relevante sobre la situación, condicionantes, desarrollos futuros, etc. que pueden resumirse en la Figura 11.

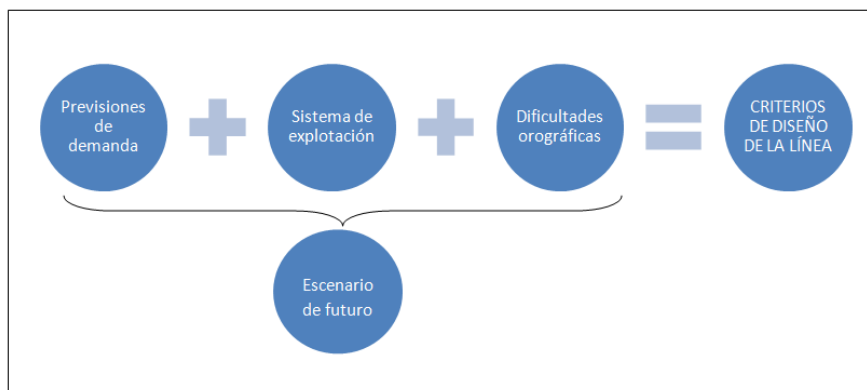


Figura 11: Ecuación fundamental de la planificación

Fuente: A.L. Pita (2014)

En primer lugar, es necesario analizar el volumen de pasajeros susceptible a utilizar la línea. Este es un dato que se encuentra dentro de un amplio intervalo de valores y presenta grandes diferencias entre los distintos países.

Además, el tráfico de viajeros en una línea resulta un factor decisivo para el sistema de explotación, ya que se recomienda que si el tráfico de viajeros es mayor a 15 millones al año no se mezclen viajeros y mercancías. (Pita, 2014)

A continuación se analiza la situación de algunos de los países con alta velocidad.

En primer lugar Japón, donde se inauguró la primera línea de alta velocidad del mundo. Se trata de un país en el cual las zonas urbanas presentan una gran densidad de población. Los volúmenes de tráfico en las líneas japonesas resultan mucho mayores que en el resto de países. En el caso concreto de la Tokaido en el año de su apertura presentaba un tráfico de 11 M de pasajeros al año y, siete años más tarde, el tráfico era ya de 85 M de pasajeros al año tal y como puede verse en la Figura 12.

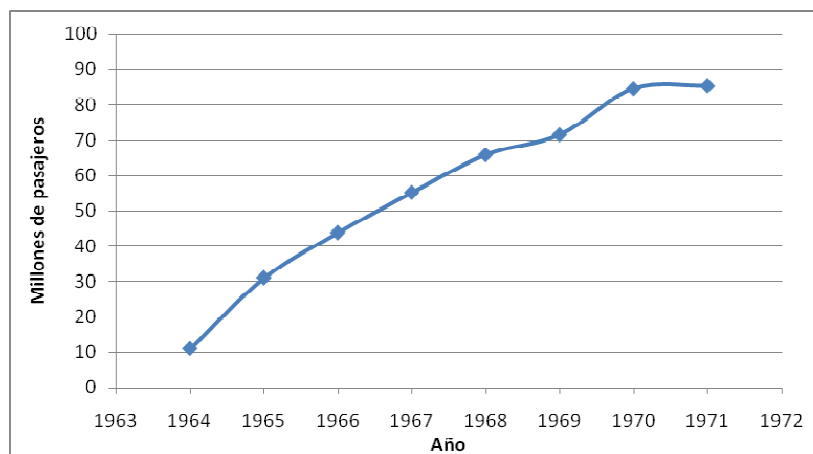


Figura 12: Evolución del tráfico de viajeros en la línea Tokaido

Fuente: A. L. Pita (2014)

Las demás líneas japonesas que se inauguraron con posterioridad tuvieron un éxito semejante y en la actualidad, dan servicio a aproximadamente 24.000 viajeros por día. Los volúmenes de tráfico anual se sitúan en torno a valores de 80-100 M viajeros al año.

Sin embargo, estas cifras se ven superadas por el tráfico existente en China. Su tardía incorporación al mundo de la alta velocidad no ha impedido su rápido crecimiento tanto en longitud de red como en demanda. La apertura de su primera línea tuvo lugar en 2008 con un tráfico de 128 M de pasajeros y en 2013 se incrementó hasta 672 M. De hecho, ese mismo año la red china alcanzó 214 billones de pasajeros-km, cifra superior al resto de redes de alta velocidad en el mundo y 2,5 veces el volumen de Japón, la segunda red más concurrida.

A otro nivel, se encuentran los países europeos con volúmenes de tráfico mucho menores que los hasta ahora citados como por ejemplo, Francia que en la apertura de la línea París-Lyon tan solo contó con 1,2 M de viajeros.

Sin embargo, este número fue creciendo y tres años más tarde obtuvo prácticamente 14 M de viajeros. En la actualidad las líneas francesas presentan unos valores aproximados de 20-25 M de pasajeros al año tal y como puede observarse en la Tabla 5.

Línea	Tráfico anual [M viajeros/año]
TGV Sureste	26,6
TGV Atlántico	24,9
TGV Norte	25,6

Tabla 5: Tráfico de viajeros en líneas francesas de alta velocidad
Fuente: E. Aranda (2006)

Por lo que a España se refiere, las cifras son aún menores ya que se encuentran entre los 5-7 M de viajeros al año, siendo las líneas más usadas las conexiones Madrid-Sevilla y Madrid-Barcelona.

Estos datos muestran las evidentes diferencias existentes en cuanto al tráfico de pasajeros en los países mencionados.

Se incluyen además los datos proporcionados por la UIC en la Figura 13 referentes a los pasajeros-km en las principales redes de alta velocidad en el mundo.

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
China (China Railway):2016	46.3	105.8	144.6	214.1	282.5	386.3	464.1
Japan (JR group):2016	76.9	79.6	84.2	87.4	89.2	97.4	98.6
Korea (Korail):2016	11.0	13.6	14.1	14.5	14.4	15.1	16.3
Taiwan (Taiwan High Speed Rail Corp.):2016	7.5	8.1	8.6	8.6	8.6	9.7	10.5
France (SNCF):2016	51.9	52.0	51.1	50.8	50.7	50.0	49.1
Germany (DB AG):2016	23.9	23.3	24.8	25.2	24.3	25.3	27.2
Spain (Renfe Operadora):2016	11.7	11.2	11.2	12.7	12.8	14.1	15.1
Italy (Trenitalia):2013	11.6	12.3	12.3	12.8	12.8	12.8	12.8
Other European Companies	7.3	10.5	14.8	15.2	18.2	20.0	22.0
Total	248.2	316.6	365.7	441.3	513.5	630.6	715.7

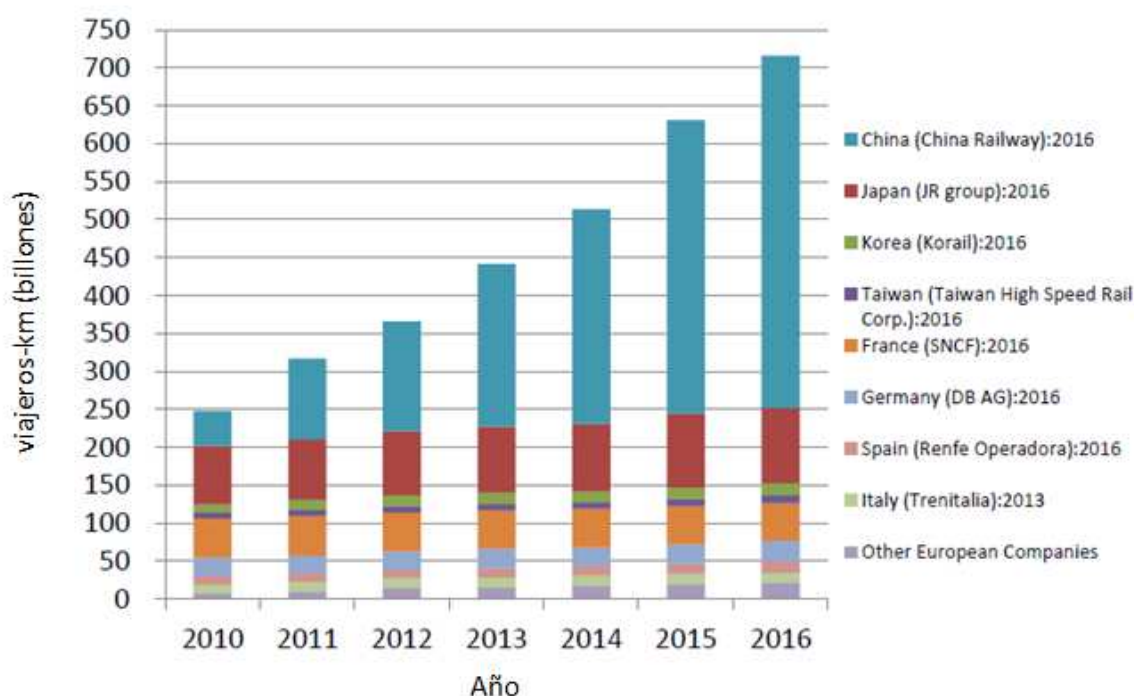


Figura 13: Tráfico de viajeros en las principales redes de alta velocidad en el mundo
Fuente: UIC (2017)

Como ya se ha mencionado, Japón y China presentan los valores más altos, seguidos a mucha distancia de Francia; por el contrario, los valores menores se encuentran en España, Italia y Taiwan.

Con todos estos datos puede constatar que la demanda de viajeros resulta relevante a la hora de plantear el diseño y el tipo de explotación de la línea. De hecho, juntamente con las características orográficas permite desarrollar un correcto diseño de la línea de alta velocidad teniendo en cuenta todos sus componentes.

El estudio de estos datos permite pues tomar decisiones en cuanto a parámetros geométricos como son rampas máximas o radios mínimos, pero también aquellos referentes al sistema de vía, en placa o sobre balasto.

6. La vía sobre placa de hormigón

6.1. Definición y componentes de la vía en placa

La vía en placa es aquella en la que el balasto es reemplazado por materiales más rígidos como el hormigón o el asfalto. Los elementos constitutivos de este modelo de superestructura son: plataforma, capa de protección anti heladas, placa base, placa principal, fijaciones, carriles, elastómeros y elementos adicionales como por ejemplo traviesas. (Escolano, 1998)

- Plataforma. Es el elemento portante sobre el que descansa o se cimenta la superestructura. Su naturaleza y características geotécnicas condicionan el diseño de los restantes elementos constitutivos de la misma. En general, estará constituida por la subbase del terreno, una capa protectora de la subbase y la capa anti helada.
- Placa base. Es el elemento sobre el que descansa la vía en placa propiamente dicha. Va inmediatamente encima de la plataforma. Puede ser un suelo de grava cemento o una solera de hormigón en masa o armado.
- Placa principal. Es la capa de hormigón armado o asfalto sobre la que descansan los carriles y traviesas.
- Fijación del carril. El sistema de fijación del carril ha de estar diseñado según el modelo de placa. Debe permitir regular el posicionado del carril en planta y alzado para poder corregir posibles fallos de montaje o desviaciones debidas a posteriores asentamientos.

Puede verse a continuación en la Figura 14 un esquema de la estructura descrita.

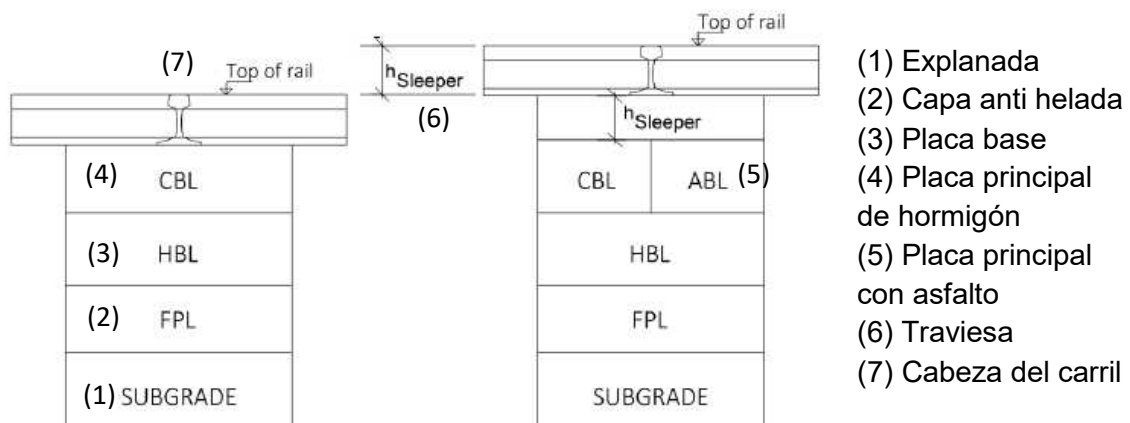


Figura 14: Sección tipo de vía en placa con o sin traviesas
Fuente: K. Serdelová (2015)

Cabe destacar que el hecho de eliminar el balasto, y en algunos diseños las traviesas, provoca que los elementos que constituyen este sistema deben asegurar las funciones de los elementos ausentes. Normalmente pues deben incluirse componentes elásticos bajo el carril o traviesas. Se pretende que los elementos del sistema de

superestructura de vía se mantengan inmóviles en el tiempo, especialmente aquellos relacionados con la geometría de la vía.

Existen muchos diseños de sistemas sin balasto basados en dos grandes clasificaciones: sujeción continua del carril o sujeción discreta. Más adelante se entrará en detalle en la definición de los diversos sistemas.

6.2. Motivación de la vía en placa

La vía en placa nació con el impulso de la alta velocidad, sin embargo, una de sus primeras aplicaciones ha sido en los túneles de los ferrocarriles metropolitanos. El elevado coste de mantenimiento de la vía sobre balasto que imponen los condicionantes de la explotación ha hecho que la vía en placa sea la solución más aplicada en estos casos en los últimos años.

Este tipo de superestructura surge como respuesta a la necesidad de disminución de los trabajos de mantenimiento de la vía, sin pérdidas en la estabilidad y seguridad en la marcha de los vehículos. Además, la tendencia hacia un modelo de ferrocarril cada vez más rápido ha mostrado la dificultad en algunos casos para mantener la calidad de la vía sobre balasto y hacer frente a problemas como el vuelo del balasto. Este efecto consiste en el levantamiento del balasto cuando los trenes circulan a velocidades mayores a 300 km/h provocando daños en el material rodante y vías. (Estradé, 1998)

Sin embargo, el uso de la vía en placa no se extendió de forma generalizada ya que presentaba un coste de construcción que por aquellos años resultaba sustancialmente mayor que el del balasto. Además, la construcción de la vía en placa presentaba unos rendimientos menores debido a la necesidad de asiento de los terraplenes antes de construcción para evitar asientos diferenciales durante su puesta en funcionamiento.

La reparación del hormigón bajo estas condiciones resulta muy costosa e implica importantes afectaciones al normal funcionamiento de la vía. Se puede observar en la Tabla 6 la diferencia de costes de algunas de las líneas francesas y japonesas.

País	Líneas	M€/km
Francia	París-Lyon	2,85
	TGV-Atlántico	4,75
Japón	Tokaido	12,35
	Sanyo	13,78
	Joetsu	30,88
	Tohoku	20,43

Tabla 6: Costes de construcción de algunas líneas de alta velocidad
Fuente: A. L. Pita (2014)

Puede apreciarse la gran diferencia existente entre las líneas francesas construidas con vía sobre balasto y las líneas japonesas teniendo en cuenta el estado de la tecnología en ese momento.

La gran inversión económica inicial pretende compensarse con una reducción de los costes de mantenimiento debido al menor deterioro de las vías de forma que al cabo del tiempo resulte más rentable tal y como puede observarse en la Figura 15.

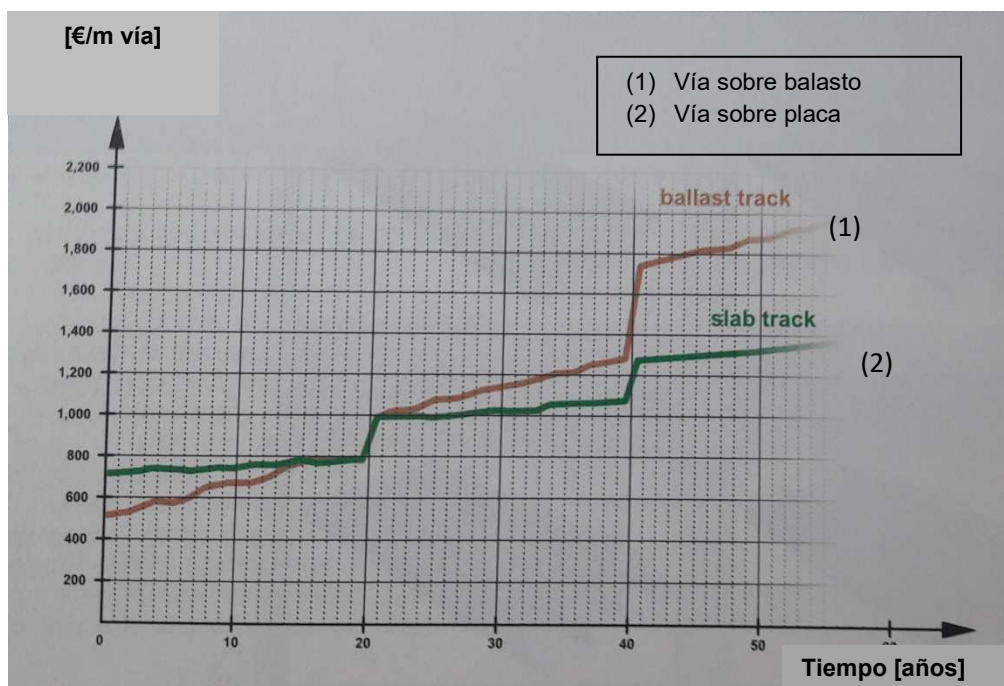


Figura 15: Tendencia general de la evolución de los costes de explotación y construcción entre la vía sobre balasto y sobre placa
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

Es por eso que durante los últimos años algunas administraciones ferroviarias como las japonesas o alemanas han ido desarrollando nuevas tecnologías para poder suplir las desventajas que a priori la vía en placa presenta. El interés por mejorar la viabilidad de este tipo de sistema se encuentra en la tendencia creciente en cuanto a velocidades así como en el aumento de las circulaciones ferroviarias y la consecuente reducción del tiempo destinado al mantenimiento.

7. Tramos excepcionales con vía sobre placa de hormigón

La vía debe tener unas características determinadas de elasticidad y amortiguamiento, que se han resuelto de forma adecuada durante muchos años con el sistema de la vía sobre balasto. Con esta solución, el mantenimiento de la geometría de la vía y por extensión el de la plataforma de balasto, requieren una serie de operaciones cuyo grado de dificultad aumenta cuando deben realizarse por ejemplo en túneles.

Así pues, aunque la decisión sobre la elección de una de las dos superestructuras de vía es una cuestión de rentabilidad en la mayoría de los casos, existen situaciones en las que claramente la vía en placa es un sistema muy ventajoso. Se trata de secciones puntuales como son los túneles, los puentes y las estaciones y entornos urbanos.

7.1. La vía en placa en túneles

La primera aplicación de la vía sin balasto fue su instalación en túneles. El hecho de tener ya una losa de hormigón como base y el limitado gálibo para el paso de maquinaria lo convierten en el lugar que mejores condiciones presenta para la aplicación de la vía en placa. Es importante también destacar que los gastos de primer establecimiento son solo algo más elevados que los exigidos por una vía tradicional.

La principal ventaja que aporta esta solución es que permite reducir el volumen de excavación ya que forma parte de la propia solera de los túneles tal y como puede observarse en la Figura 16.

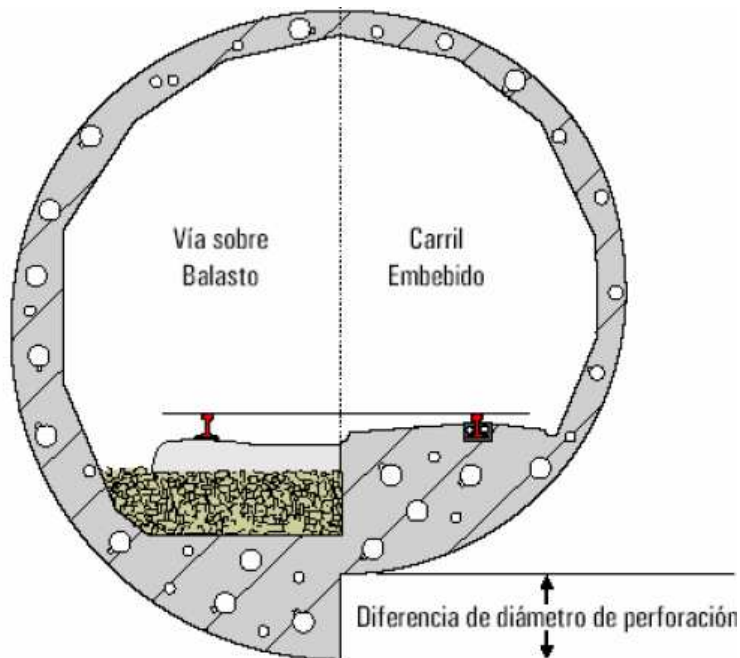


Figura 16: Diferencia en el volumen de excavación entre ambos sistemas de vía
Fuente: Edilon Sedra

De hecho, la cota de la vía sin balasto, incluyendo la capa de hormigón inferior y el carril, se rebaja en 250 mm en el tipo Rheda en comparación con la superestructura de balasto. En el caso de la variante italiana, esa reducción es de hasta 350 mm y no tan

solo reduce el volumen de excavación sino que además permite un mayor gálibo para la ubicación de instalaciones eléctricas.

Además algunas de las variantes de la vía en placa proporcionan transitabilidad sobre la plataforma de vías y facilitan así el cumplimiento de las exigencias de seguridad y evacuación de pasajeros en caso necesario.

También debe mencionarse la mayor facilidad para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento. Como ya se ha dicho, estas conllevan la generación de polvo y en consecuencia una reducida visibilidad que puede resultar peligrosa, ya que muchas veces se realizan circulaciones en el sentido contrario en condiciones de gálibo estricto.

Con la vía en placa se reducen las incomodidades fundamentalmente medioambientales producidas por la ejecución de las tareas como el bateo, propias de las infraestructuras de vía de tradicionales.

En este caso resulta de especial importancia disponer de unas condiciones geológicas apropiadas. Los túneles en zonas con desprendimientos de roca o bien suelos expansivos pueden impedir la aplicación de la vía en placa.

Normalmente no se aplica una capa de aglomerado hidráulico sino que se aplican las capas de hormigón directamente en el suelo con espesores reducidos gracias a la solidez de la superficie de apoyo proporcionada por una solera o por la contrabóveda de hormigón armado.

Una muestra del amplio conocimiento de la vía en placa y su aplicación en estas situaciones es su aparición en la normativa española. La Orden FOM/3317/2010 indica que “se instalará vía en placa en todos los túneles de más de 1.500 m de longitud, siempre que no existan otras circunstancias que puedan desaconsejar este tipo de vía. En esos casos, así como en aquellos trayectos en que la sucesión de túneles y viaductos alcance esa longitud, en los túneles entre 500 y 1.500 m, o cuando otras consideraciones así lo aconsejen, para adoptar la decisión entre vía en placa o vía en balasto se realizará un estudio técnico-económico, que incluya el tipo de tráfico, las condiciones y costes de construcción, explotación y mantenimiento y el coste asociado a la transición placa-balasto”.

7.2. La vía en placa en puentes

La principal utilidad que presenta la vía en placa en estas situaciones es que al formar parte del propio tablero del puente permite reducir la sobrecarga permanente en este. En la Figura 17 puede verse una sección tipo de vía en placa en un puente.

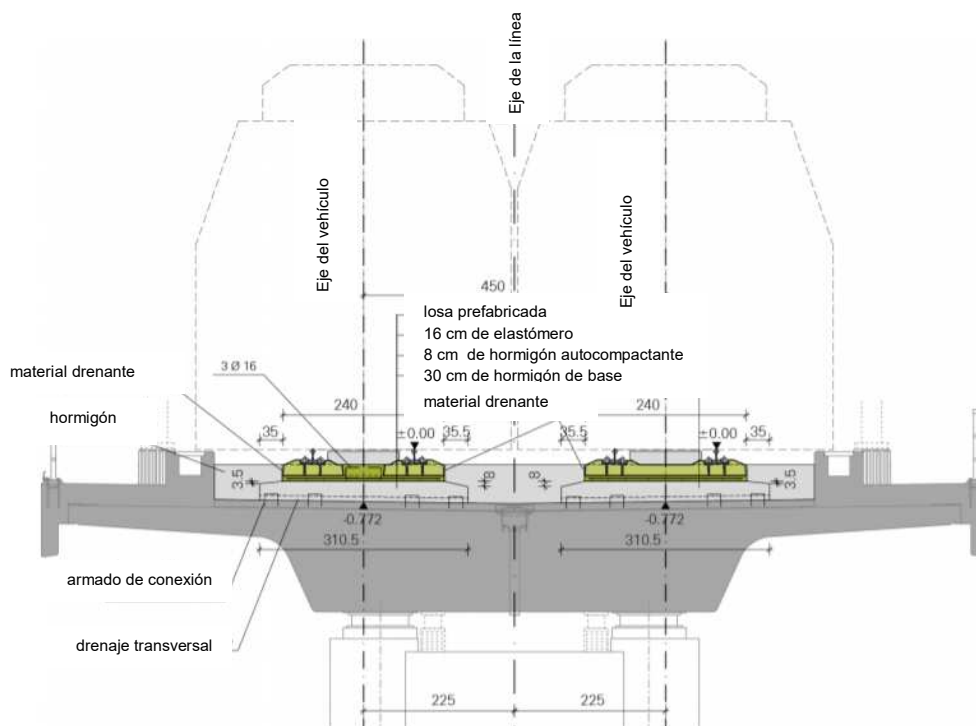


Figura 17: Sección tipo de vía en placa en un puente
Fuente: D. Pichler (2014)

No obstante, la aplicación de este sistema puede causar problemas si no se consideran ciertos comportamientos mecánicos como son las cargas dinámicas que producen los trenes cuando circulan. A pesar de que el puente en sí mismo resulta una base sólida para la vía en placa, los cambios de temperatura y las cargas dinámicas mencionadas pueden causar movimientos longitudinales, flexión en los vanos y torsión de los soportes. Además en los puentes de hormigón deben tenerse también en cuenta las deformaciones por fluencia y retracción.

Para evitar estos efectos y garantizar que el puente sea capaz de soportar estos movimientos, se requiere realizar la instalación mediante la descomposición en placas prefabricadas individuales separadas o mediante una losa realizada in situ. Así mismo, ya que las placas están separadas de su infraestructura por una junta, se ha de colocar entre la placa y la solera del puente un dispositivo de anclaje.

Los sistemas de vía en placa en los puentes deben adaptarse a las condiciones técnicas de estas estructuras. Las rotaciones del extremo de la viga debidas a las cargas de tráfico se deben limitar a 2‰. Tienen también que verificarse las fuerzas que producen el levantamiento del carril cerca de las juntas del puente para evitar el fallo de las sujeciones y las excesivas tensiones en el carril, así como la capacidad de absorción de dilataciones longitudinales sin provocar tensiones demasiado altas.

Por lo que al diseño de la vía en placa se refiere, se ve especialmente condicionado por la luz del puente. Para puentes cortos, considerando aquellos menores a 25 m, la vía en placa puede realizarse de forma continua. Esta limitación de la extensión permite que las fuerzas horizontales de los frenos y/o el arranque se disipen por la vía soldada en continuo en dirección longitudinal sin superar la tensión del carril permitida, siendo por ello necesario que dicha vía se extienda 40 metros más allá del extremo del

puente. Las vías sin balasto se apoyan en sentido longitudinal sobre un plano deslizante que permite su movilidad mientras que la dispersión de las fuerzas laterales horizontales se obtiene por medio de rodamientos de guía de elastómeros. (SFF Ingenieure, 2012)

Para los puentes que poseen una extensión de más de 25 metros es necesaria una descomposición mediante placas individuales que se fijan a su estructura.

Básicamente, la placa de la superestructura de la vía está apoyada en forma elástica y no se puede desplazar en dirección longitudinal o transversal. La disipación de las fuerzas laterales horizontales se obtiene por medio de una unión por presión entre la superestructura de vía y el puente a través de una placa convexa en la que la superestructura de la vía encaja mediante levass. Se colocan también almohadillas elastoméricas simples para disipar las fuerzas de dirección longitudinal y transversal.

Cabe destacar también que por razones estructurales y de conservación es conveniente mantener el mismo tipo de vía sin balasto en el trayecto de vía libre y sobre puentes.

Por último, se presentan en la Figura 18 y Figura 19 dos secciones típicas para puentes de longitud menor y mayor a 25 m respectivamente.

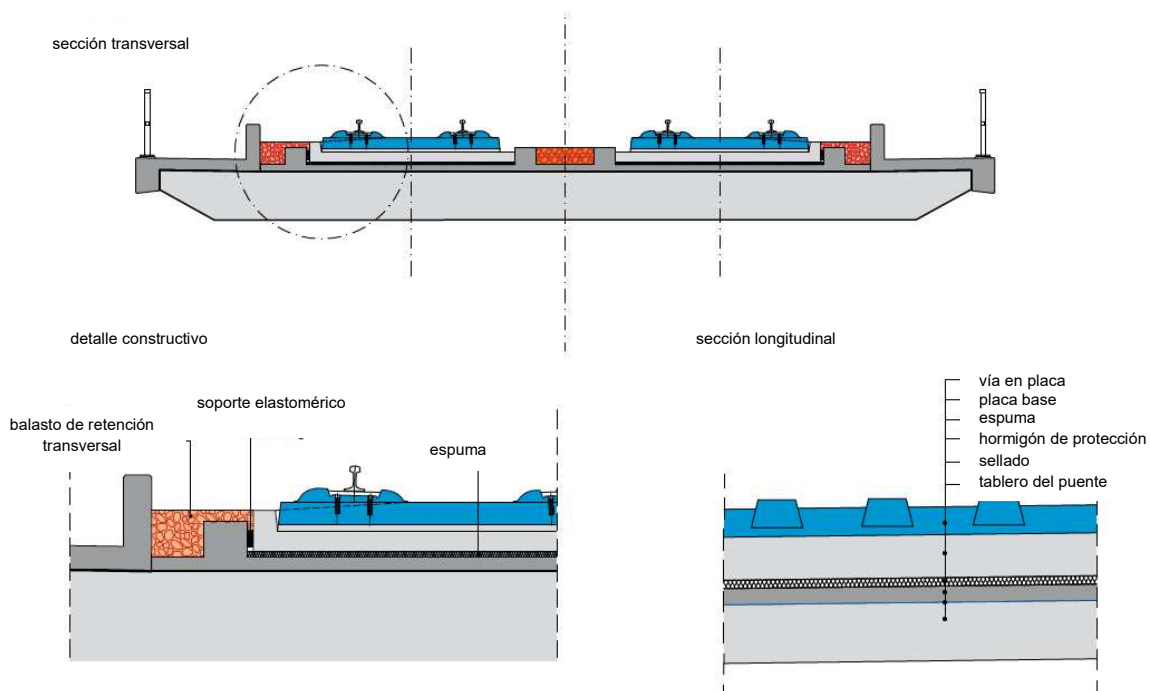


Figura 18: Sección de puente de longitud menor de 25 m
Fuente: SFF Ingenieure (2012)

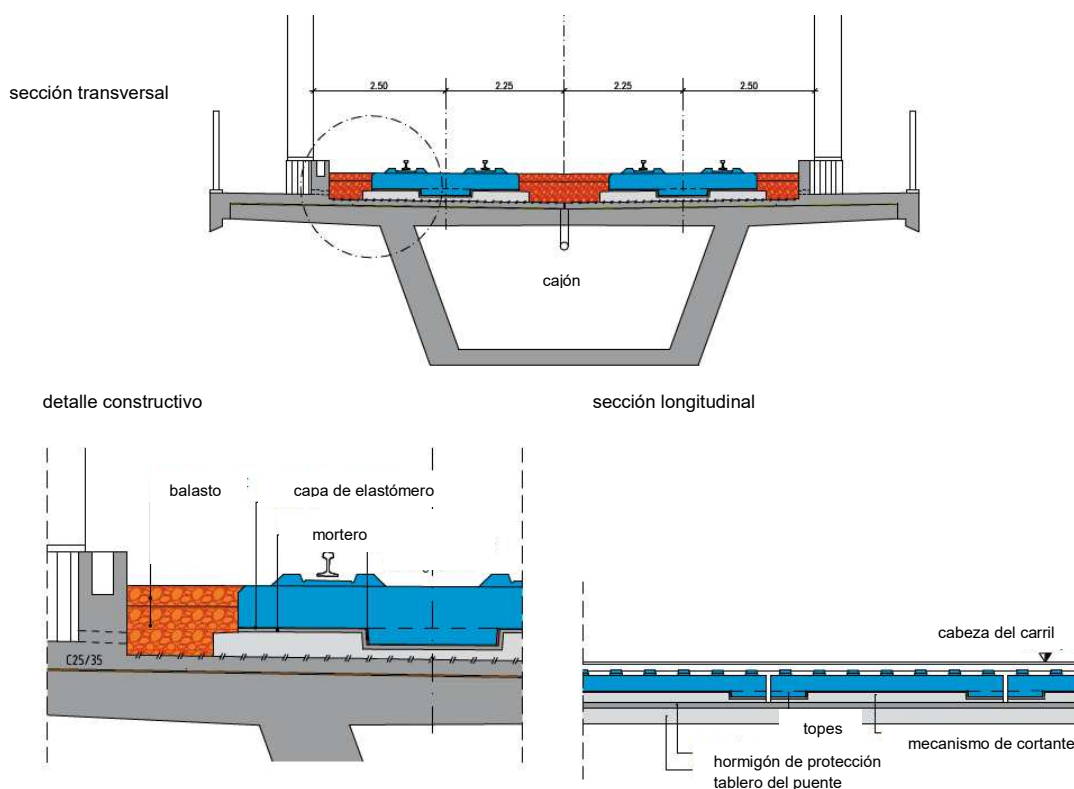


Figura 19: Sección de puente de longitud mayor de 25 m
Fuente: SFF Ingenieure (2012)

7.3. La vía en placa en estaciones e inmediaciones urbanas

La vía en placa es el sistema más adecuado en estas situaciones debido principalmente al mantenimiento que requiere el balasto. Se ha mencionado ya que este normalmente se realiza en horario nocturno y que implica emisiones de polvo y ruido. Por lo tanto, resulta difícil compaginar las operaciones de mantenimiento con las restricciones en los niveles de ruido y con el descanso de aquellos que se encuentran en el entorno más inmediato.

Además, en las estaciones resulta difícil llevar a cabo las operaciones de mantenimiento debido a una cuestión de espacio entre andenes.

No debe tampoco olvidarse que es en las estaciones e inmediaciones donde se produce el frenado de los trenes a través de las corrientes de Foucault. La vía en placa presenta un mejor comportamiento ante estas situaciones ya que no presenta problemas con la temperatura del carril.

En múltiples situaciones se adopta una solución en túnel para las estaciones y el paso por zonas urbanas, así pues son también válidos en este caso los motivos expuestos en el caso de la vía en placa en túneles.

No obstante, la aplicación de la vía en placa conlleva problemas de transmisión acústica y vibraciones que se agravan al tratarse de zonas urbanas. Este hecho es debido a la mayor rigidez que presenta la placa ya que se ha eliminado el balasto, el elemento elástico. De hecho, los primeros ensayos en algunas líneas japonesas

probaron que el nivel de ruido de la vía en placa era de unos 5 dB más alto que en la vía sobre balasto.

Al aumentar las velocidades, las cargas por eje y la frecuencia del tráfico en las líneas ferroviarias actuales, también aumentan los efectos en el entorno producidos por ruidos y vibraciones. Puede distinguirse la emisión de ruido aéreo por interacción rueda carril principalmente y la emisión de vibraciones al terreno. Se transmiten vibraciones al subsuelo debido a las irregularidades entre rueda y carril, así como por las deformaciones dinámicas de los carriles al paso de los vehículos. Estas vibraciones se propagan por las edificaciones colindantes provocando que estas a su vez puedan vibrar en mayor o menor medida. (ARUP, 2017)

La transmisión de vibraciones cobra especial importancia en los túneles en las zonas urbanas. Deberá analizarse la capacidad de transmisión del terreno, la profundidad del túnel y cimentaciones y también la distancia a los edificios para escoger el sistema más adecuado.

El sistema de vía en placa requiere pues la introducción de elementos elásticos que garanticen la amortiguación de los desplazamientos verticales y vibraciones reduciendo así las molestias sobre la población cercana. Se puede observar en la Figura 20 un esquema de la transmisión de ruido y vibraciones por el paso de los trenes.

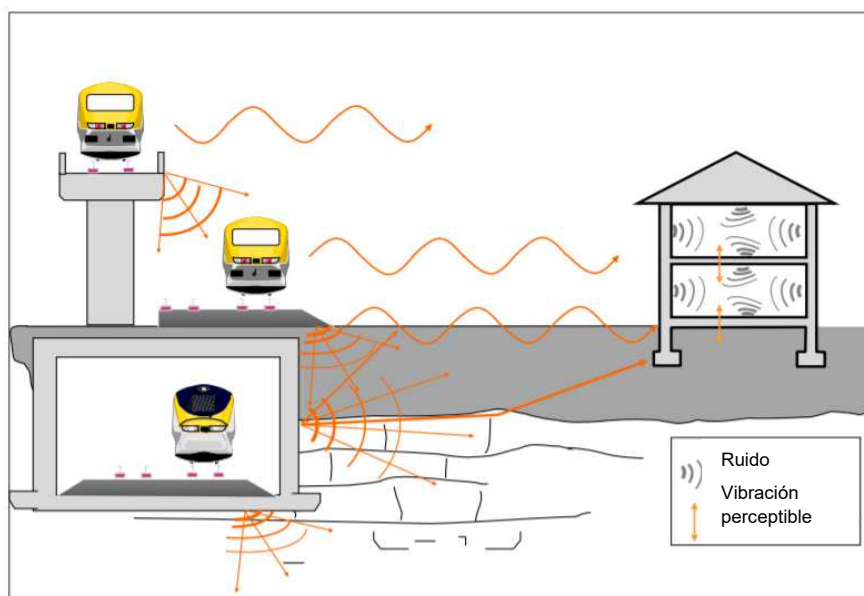


Figura 20: Esquema de transmisión de ruido y vibraciones del ferrocarril
Fuente: ARUP (2017)

Una de las medidas más eficaces contra el ruido propagado por estructuras sólidas y vibraciones relacionadas con la vía en placa son los llamados sistemas de masa-muelle. Estos consisten en utilizar bandas o apoyos individuales de elastómero entre el subsuelo y la placa. También existe el sistema LVT Sonnevile, que se expondrá más adelante, o bien la posibilidad de usar materiales cerámicos u hormigones porosos. Sin embargo, puede proponerse también una alternativa generalizada de este tipo de sistema cuando los condicionantes técnicos y económicos así lo determinen.

8. La utilización de la vía en placa en Japón

En Japón la alta velocidad llegó en el año 1964 con la línea Tokaido-Shinkansen.

Hasta el momento y debido a los condicionantes orográficos, la red japonesa era de ancho métrico lo cual conllevaba limitaciones de velocidad máxima y de capacidad. Se observó que la línea entre Tokio y Osaka estaba cerca del límite de capacidad de transporte tal y como puede verse en la Figura 21.

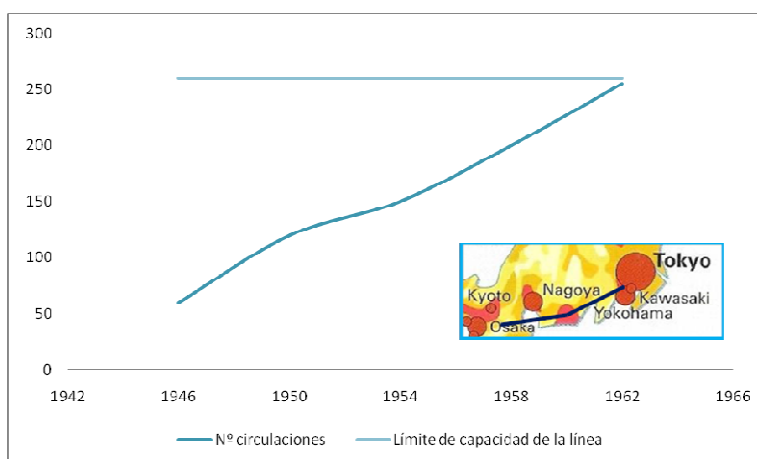


Figura 21: Crecimiento en la circulación de trenes en la línea Tokio-Osaka
Fuente: A. L. Pita (2014)

A este hecho se añadía la tendencia creciente del tráfico por ferrocarril, con lo que la búsqueda de una solución pasaba por la construcción de una nueva línea.

La inexperiencia en explotación de trenes a alta velocidad, la importante inversión económica que se requería y la financiación no asegurada no frenaron la puesta en marcha de una línea de alta velocidad de ancho internacional.

Así pues, el 1 de octubre de 1964, los Ferrocarriles Japoneses (JNR) pusieron en servicio la línea Tokaido-Shinkansen a 210 km/h con traviesas de hormigón dispuestas sobre lecho de balasto. En la Figura 22 se muestra la ceremonia de inauguración de esta línea.



Figura 22: Ceremonia de inauguración en Tokio el 1 de octubre de 1964
Fuente: L. Rodríguez (2014)

La línea se estrenó con un tráfico de viajeros de 11 M al año que fue creciendo con el paso del tiempo. Sin embargo, transcurridos doce años fue necesario cambiar todo el balasto de la vía, operación que duró cinco años y obligó a reducir el número de circulaciones al día de 230 a 180. La puesta en servicio de dicha línea puso de manifiesto que su superestructura de vía sobre balasto no podía garantizar el mantenimiento de la calidad geométrica con la tecnología de conservación aplicada en aquel entonces. Además, la escasez de medios de los JNR no permitió hacer los tratamientos de terreno necesarios ni utilizar materiales de excelente calidad para los rellenos de sus 230 km de terraplenes. El hecho que la placa de asiento fuera excesivamente rígida favoreció también al rápido deterioro de la vía.

Cabe destacar también que debido a la topografía, similar o incluso peor que la española, los túneles, viaductos y los tramos de vía elevados sobre pórtico representaban prácticamente la mitad del recorrido. Esta heterogeneidad longitudinal por lo que a rigidez vertical se refiere comporta un gran deterioro de la vía. Ya en los primeros años de servicio se evidenció un deterioro muy acelerado del balasto en las secciones sobre obras de fábrica por su mayor rigidez, así como una rápida pérdida de calidad geométrica en las secciones de transición. Como consecuencia, fue necesaria una gran inversión tanto monetaria como en tiempo para el mantenimiento de la vía. Este hecho unido a la gran demanda de viajeros que tenía dicho corredor, implicaba la necesidad de realizar el mantenimiento en horario nocturno. (Pita, 2014)

Por lo que al mantenimiento se refiere, los costes son causados principalmente por el deterioro de la vía y sus aparatos. La velocidad de circulación de los trenes, y más si es en alta velocidad, genera sobre la vía unas solicitaciones verticales superiores a las cargas estáticas habituales. Estas solicitaciones mayores provienen del paso de una carga por un punto a una cierta velocidad, pero también se ven aumentadas por las condiciones y características de la vía, los vehículos y su equipamiento, que provocan un gran deterioro de la vía.

Un mayor deterioro de la vía no se traduce solo en un mayor desembolso en mantenimiento, sino que condiciona las circulaciones ya que se necesita de cierto tiempo para realizarlas. Para la vía con balasto, las principales acciones a llevar a cabo son el bateo, el amolado del carril y, en último caso, el levante de tramos de vía. Con la tecnología que se poseía en el momento resultaban fáciles de ejecutar aunque debían realizarse con mayor frecuencia y en vías con gran afluencia de pasajeros puede resultar un gran inconveniente.

En Japón, donde la demanda de viajeros es tan alta, las horas libres de circulación resultan insuficientes para llevar a cabo todos los trabajos de mantenimiento y reparación.

Por todos estos motivos, fue necesario desarrollar un tipo de vía que se degradara menos que la vía con balasto, así que las siguientes líneas de alta velocidad del país se proyectaron en gran parte con vía en placa. Puede verse a continuación en la Tabla 7 y en la Figura 23 el sistema usado en la construcción de las siguientes líneas japonesas.

Año	Línea	Tramo	Balasto	Placa	Total
1964	Tokaido	Tokio-Osaka	516	0	516
1975	Sanyo	Osaka-Okayama	156	8	164
1975	Sanyo	Okayama-Hakata	125	273	398
1982	Joetsu	Omiya-Niigata	15	255	270
1982	Tohoku	Tokio-Morioka	48	453	501
1997	Hokuriku	Takasaki-Nagano	20	105	125

Tabla 7: Características de las primeras líneas de alta velocidad japonesas
Fuente: CENIT (2008)

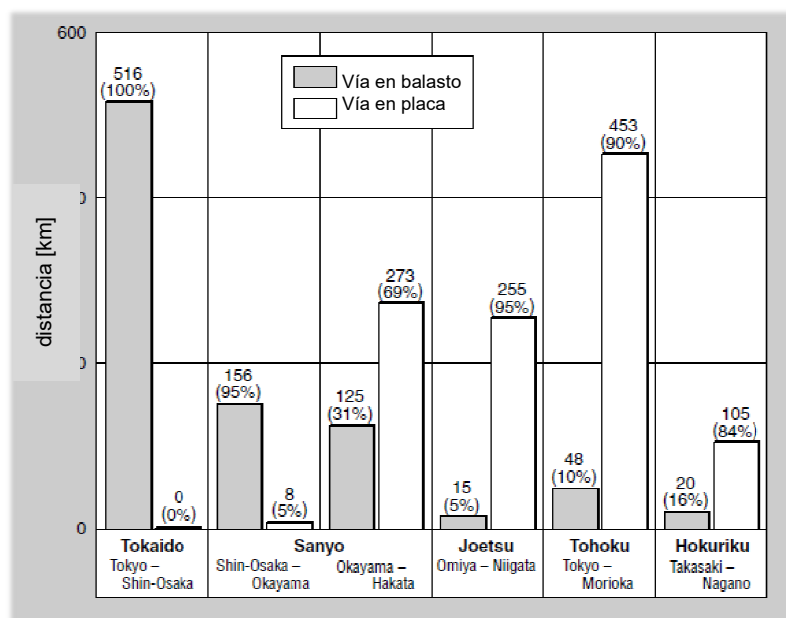


Figura 23: Proporción de balasto y vía en placa en las líneas japonesas
Fuente: S. Miura, H. Takai et al (1998)

A partir de la figura anterior se observa como en las líneas proyectadas después de la Tokaido, el porcentaje de vía construida con balasto cae hasta el 5-15% de la longitud total de las líneas.

La aplicación de la vía en placa supuso grandes ventajas sobre todo en materia de costes de mantenimiento ya que con las líneas sobre balasto era necesaria una mayor frecuencia de intervención. Puede constatarse este hecho en la Figura 24 que compara el mantenimiento necesario en la vía con balasto y sobre placa en las líneas japonesas Sanyo y Tohoku.

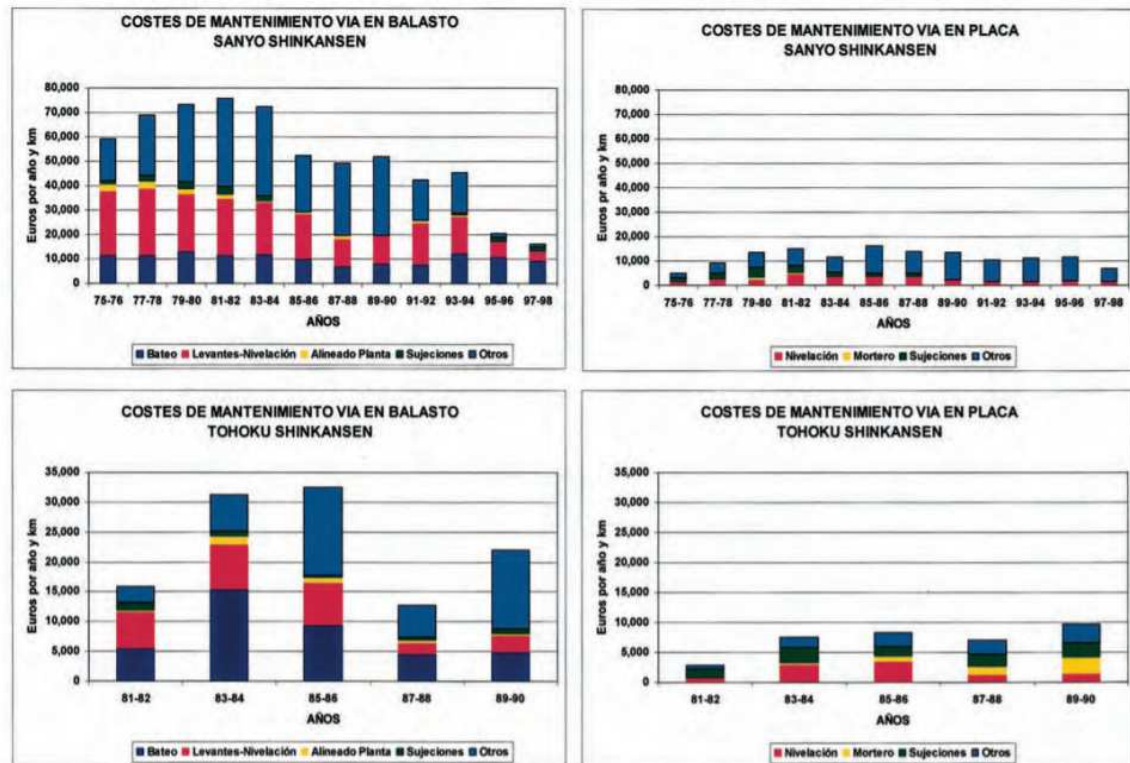


Figura 24: Comparación de los costes de mantenimiento entre líneas de balasto y vía en placa.
Fuente: M. Melis (2006)

Así pues, Japón se convirtió en uno de los impulsores de la superestructura de vía en placa logrando implantarla con éxito en prácticamente todas sus líneas y desarrollando además su propio modelo, la vía en placa Shinkansen.

9. Posible interés de vía sobre placa en una línea de alta velocidad en España

Hasta el momento las líneas de alta velocidad española se han construido sobre balasto obteniéndose con este sistema una red capaz de alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h. Sin embargo, en los últimos tiempos se han desarrollado diferentes soluciones constructivas, técnica y económicamente muy competitivas que pueden resultar factibles en el proyecto de la Y vasca.

Si bien es cierto que en muchas de las líneas actuales se ha usado la vía en placa en secciones como túneles y estaciones como se mostrará a continuación, el objetivo de este apartado es analizar los condicionantes de la línea de alta velocidad para plantear la posible aplicación de la vía en placa en la totalidad de esta.

9.1. La utilización de la vía en placa en España

En España se ha implantado la vía sobre placa en situaciones puntuales como las mencionadas en el apartado 7.

A finales de la década de los setenta, se construyó un tramo experimental entre Ricla y Calatorao en la línea convencional Madrid-Barcelona como puede verse en la Figura 25. Fue el tramo de ensayo sobre placa más largo del mundo con una longitud de 4,1 km. Se instaló el modelo PACT, que se explicará con detalle más adelante, aunque presentó distintos problemas y se desmanteló. (Vía Libre, 1976)



Figura 25: Perspectiva de la estación de Calatorao
Fuente: Vía Libre (1976)

Posteriormente, ya entrados en la primera década del nuevo siglo, se construyeron tramos de ensayo en Medina del Campo con el sistema BBEST que presentaron buenos resultados a velocidades de 240 km/h. Estos pueden observarse en la Figura 26.



Figura 26: Pruebas de vía en placa en Medina del Campo
Fuente: Balfour Beatty (2006)

También se llevaron a cabo seis tramos de prueba en la línea del corredor del Mediterráneo, concretamente en el tramo de Las Palmas de Castellón-Oropesa del Mar, en el cual se ejecutaron seis sistemas distintos en tramos a cielo abierto. Se utilizaron los siguientes sistemas: Edilon, Rheda 2000, Rheda Dywidag, Stedef, Getrac y ATD. Las conclusiones después de las pruebas fueron que la vía en placa a alta velocidad y a cielo abierto debe conciliar los siguientes factores:

- Exigentes tolerancias geométricas derivadas de la alta velocidad y de la naturaleza de los modelos.
- Tratamiento de las variaciones térmicas del carril y de los factores meteorológicos durante la fase de construcción.
- Problemas logísticos emanados de la singularidad de los sistemas y de sus componentes particulares.
- Alto coste de construcción. (Peña, 2003)

Se instalaron también sistemas de vía en placa en túneles como el de Guadarrama o el del Pertús.

Por su parte, el túnel del Pertús se encuentra en la línea ferroviaria que conecta con Francia y está constituido por dos tubos de 8,2 km en los cuales se instaló el sistema de vía en placa Rheda 2000.

El mismo sistema fue instalado en el túnel de Guadarrama construido a través de la Sierra entre Madrid y Segovia. De hecho, constituye el hito más destacado de las obras ferroviarias realizadas en España, por su longitud de 28,4 km y por su velocidad máxima de 350 km/h.

En el ámbito de las estaciones destacan la de Atocha en Madrid, la de Sants en Barcelona, Delicias en Zaragoza y la estación de Toledo. Todas estas estaciones

están realizadas con la variante Edilon, una tipología distinta de vía en placa de la utilizada en los túneles.

La experiencia en el estado español se basa en el uso del sistema Rheda 2000 en túneles de gran longitud y el sistema Edilon para estaciones y ámbitos más urbanos.

Por último, destacar que una de las líneas con un mayor porcentaje de vía sobre placa es la línea Barcelona-Frontera francesa. Se trata de la línea que une la península con Francia y que en parte de su trayecto admite tanto trenes de viajeros como de mercancías. Las características orográficas de la zona conllevaron la construcción de 30 túneles y 60 viaductos representando respectivamente entorno el 10 y el 25% de la totalidad de la línea. Se usaron los sistemas ya descritos en todas estas obras de fábrica como entre Sagrera y Mollet tal y como puede observarse en la Figura 27 y se introdujo también el sistema Sonnevile. (ADIF, 2012)



Figura 27: Montaje de vía entre La Sagrera y Mollet del Vallès
Fuente: ADIF (2012)

9.2. ¿Qué es la Y vasca?

La alta velocidad se distribuye de forma poco homogénea en el territorio y es un hecho que el País Vasco queda al margen de esta infraestructura.

En la actualidad en España hay 3.240 km de líneas de alta velocidad. Desde su primera línea en 1992, la red española de alta velocidad ha multiplicado su longitud prácticamente por siete. Se puede observar la gran cantidad de líneas existentes en la actualidad, de hecho, hay 54 km de vía por millón de habitantes.

En la Figura 28 se muestra una comparación con los principales países que disponen de alta velocidad para poder tener un orden de magnitud.

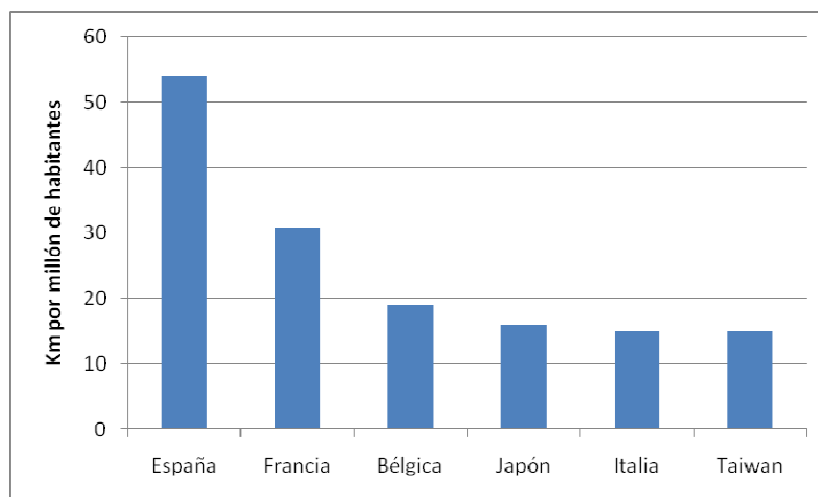


Figura 28: Longitud de vía de alta velocidad por millón de habitantes en distintos países
Fuente ABC Economía (2015)

En la siguiente Figura 29 se puede ver la distribución de la red de alta velocidad en el territorio peninsular.



Figura 29: Mapa de las líneas de alta velocidad en España
Fuente: ADIF Alta Velocidad

La imagen muestra como la zona norte del país se encuentra actualmente desconectada de la alta velocidad. El gran reto de los ferrocarriles españoles es pues realizar la conexión del País Vasco con otras regiones españolas y posibilitar también así la conexión con Francia.

Este proyecto se enmarca en el Plan Director de Transporte de la Unión Europea en el cual se declara una red de alta velocidad como una infraestructura prioritaria a nivel europeo. Es parte del Proyecto Prioritario Número nº 3 “Eje ferroviario de alta velocidad del sudoeste de Europa” constituyendo así un proyecto europeo pero a la vez un proyecto de país ya que, la conocida popularmente como Y vasca, tiene como objetivo unir las tres capitales vascas (Bilbao, Donostia-San Sebastián y Vitoria-Gasteiz) tal y como puede verse en la Figura 30. (Echebarria, 2003)



Figura 30: Recorrido Y vasca.
Fuente: EUSKALYVASCA

La Y vasca supondrá la mayor infraestructura de transporte construida en esta comunidad. Está pensado que discurra por las tres provincias del País Vasco y será la primera vez que se aplique el sistema de ancho de vía internacional en este territorio.

9.3. Características de la línea

Con la ecuación fundamental de la planificación presentada con anterioridad ha quedado demostrada la importancia que adquiere en este ámbito la demanda que soporta una línea. Por eso, es necesario analizar el volumen de pasajeros susceptible a utilizar esta línea de alta velocidad.

Según el Estudio de la movilidad en la Comunidad Autónoma Vasca que se publicó en 2003, los residentes en esta comunidad realizan en un día laborable 2,7 desplazamientos por persona aunque cabe destacar que los desplazamientos entre las tres capitales alcanzan tan solo un 0,72%. La movilidad entre Bilbao, San Sebastián y Vitoria se realiza a partes iguales en vehículo privado (49%) y transporte colectivo (51%). El estudio de movilidad recoge también que la tasa de incremento de la movilidad en la comunidad autónoma vasca ha sido del 2,47% i que el modo de transporte que ha absorbido en cada caso dicho incremento muestra una gran variabilidad. Puede observarse en la Figura 31 la distribución modal de la movilidad en algunas ciudades del País Vasco. De forma general pero, el transporte del ferrocarril representa tan solo un 10% del total. (Bermejo, 2004)

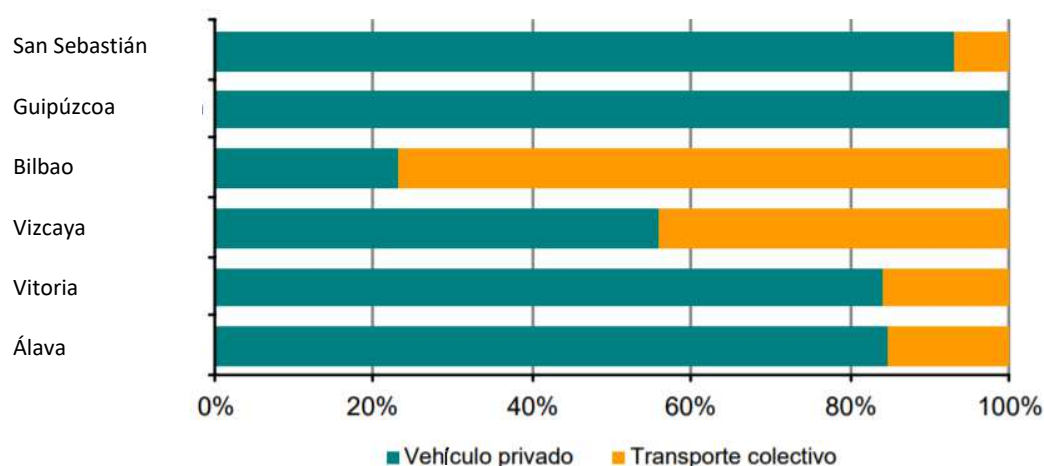


Figura 31: Movilidad por modo de transporte en el País Vasco
Fuente: R. Bermejo (2004)

Con todos estos datos sobre movilidad, puede hacerse una estimación sobre la demanda futura de la Y vasca tal y como puede verse en la Figura 32.

Año	Viajeros		Viajeros-km (miles)		Número de trenes		Tiempo entre trenes (min)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2010	2.100.000	3.300.000	203.700	320.100	8.744	13.740	60	38
2015	2.400.000	3.700.000	232.800	358.900	9.993	15.406	53	34
2020	2.700.000	4.100.000	261.900	397.700	11.242	17.071	47	31
2025	3.000.000	4.700.000	291.000	455.900	12.491	19.569	42	27
2030	3.300.000	5.200.000	320.100	504.400	13.740	21.651	38	24

Figura 32: Previsión de viajeros, trenes y frecuencias de la Y vasca
Fuente: R. Bermejo (2004)

Esta previsión se ha hecho teniendo en cuenta el crecimiento anual antes mencionado así como la demanda inducida por la alta velocidad ferroviaria que suele variar entre un 25 i 43%. Además, se ha añadido el hecho que la captación de viajeros de vehículo privado varía entre un 10 y un 40%.

Se recomienda que si el tráfico de viajeros es mayor a 15 millones al año no se mezclen viajeros y mercancías. Analizando los datos expuestos en el anterior gráfico, queda patente que la línea se encontrará lejos de esta situación y por lo tanto, es posible un sistema de explotación mixta.

La situación geográfica del País Vasco lo convierte además en un lugar de paso hacia Europa por lo que el transporte de mercancías es muy importante. La mayor parte de este transporte se realiza por carretera y tan solo el 2% se lleva a cabo con ferrocarril. Este hecho conlleva una gran congestión de las redes de carreteras que puede derivar en un incremento de la tasa de accidentes así como un aumento de la contaminación. El objetivo de esta nueva línea es modernizar la red vasca existente y reequilibrar un reparto modal de pasajeros y mercancías dominado por el transporte por carretera.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta para la planificación y que puede también condicionar enormemente el tipo de superestructura es la orografía. El relieve del País Vasco es montañoso con predominio de valles encajados y montañas. Este hecho

aumenta los costes de construcción de las infraestructuras e impone además una mayor presión sobre el medioambiente. En este caso, se prevé que el tren circule durante más del 60% de su recorrido total a través de 80 túneles. Además, está prevista la construcción de 71 viaductos que ocuparan casi el 10% del trazado. En definitiva, la línea tan solo discurre a cielo abierto aproximadamente en un 30% de su totalidad. (Bermejo, 2004)

Es un hecho que la capacidad resistente de una plataforma ferroviaria varía de forma significativa a lo largo del trazado de una línea. En general, las mayores diferencias se encuentran en las secciones que corresponden a los terraplenes de acceso a los puentes, al comparar su capacidad resistente con la correspondiente a la proporcionada por la propia obra de fábrica. Esta variación de la rigidez da lugar a asientos diferenciales que afectan a la calidad geométrica de la vía. Resulta pues un aspecto de especial atención ya que la Y vasca presenta una gran cantidad de obras de fábrica a lo largo de su recorrido.

Teniendo en cuenta las situaciones en las que normalmente se aplica la vía sin balasto tratadas en el apartado 7 del presente trabajo, se prevé que deberá usarse dicho sistema en gran parte de las secciones de la línea. Este hecho se traducirá también en un gran número de secciones que presentarán variaciones de rigidez de la plataforma debido a la transición entre vía en placa y vía sobre balasto. Es por eso que la Y vasca reúne algunas de las cualidades para ser construida en su totalidad con vía sobre placa.

En los siguientes apartados se pretende analizar las características técnicas y económicas de la vía en placa para poder así estudiar la viabilidad de su aplicación en la totalidad de la línea que nos concierne. Se va analizar también el comportamiento de las distintas tipologías de vía en placa disponibles en el mercado actual.

De esta manera se determinará si la vía en placa es el sistema más adecuado en este caso y de ser así la tipología que mejor comportamiento presentaría teniendo en cuenta las características de la línea.

10. Análisis técnico de la vía sobre placa

10.1. Comparación entre ambos sistemas de vía

Las diferencias entre las dos tipologías de vía, sobre balasto o placa, hacen referencia principalmente a la resistencia, mantenimiento y coste. Cabe destacar pero que el comportamiento de ambos sistemas se encuentra sujeto al tipo de explotación de la línea e influye en el periodo de amortización de la línea.

La característica más destacada de la vía con balasto y de hecho la principal defensa respecto al sistema de vía en placa es su bajo coste de construcción y la facilidad de mantenimiento. Los procedimientos de conservación están acreditados y avalados por la experiencia y pueden realizarse de forma sistemática con cortes poco prolongados o en horario nocturno, sin necesidad de afectar al tráfico de la línea.

Sin embargo, el mantenimiento debe realizarse de forma más continuada ya que la geometría de la vía es alterada por la circulación de los trenes especialmente cuando circulan a altas velocidades. La operación de mantenimiento más habitual es el bateo para la recompactación del balasto bajo las traviesas para poder alcanzar una densidad que garantice la estabilidad del conjunto al mismo tiempo que se restablece la geometría de su posición ideal. Esta operación resulta sencilla pero conlleva emisiones acústicas y de polvo que incrementan la contaminación y dificultan su ejecución en entornos cerrados. Además, estos procesos de rectificación causan una elevación de las vías por lo que deben ser tendidas desde el inicio con mayor profundidad que las vías sin balasto.

Por lo que a la construcción se refiere, la vía en placa exige unas tolerancias más restrictivas que las de la vía convencional sobre balasto. Es fundamental una nivelación, alineación, y ancho de vía exactos, ya que una vez construida la losa de hormigón es prácticamente imposible la corrección de los errores no pudiendo realizar modificaciones sin causar problemas a la explotación. Además, para eliminar futuros problemas de mantenimiento, es importante prever un drenaje eficaz que en el caso de la vía con balasto es el propio material quien actúa como drenante.

La vía en placa no tan solo requiere un proceso de ejecución más difícil sino que los costes de construcción resultan mucho mayores que en las soluciones constructivas realizadas con balasto. Estos aspectos económicos se analizarán con más detalle posteriormente, aunque puede adelantarse que estos pretenden paliarse con una disminución sustancial del posterior mantenimiento.

En términos de seguridad, es menos probable que se produzca un descarrilo y haya daños que comprometan la resistencia del sistema en el caso de la vía en placa ya que es más robusta y estable.

Un aspecto interesante de la vía en placa respecto al balasto es que requiere una superestructura con menor espesor. Este hecho resulta especialmente útil en secciones de túnel. Por el contrario, la vía en placa presenta un comportamiento peor cuando se instala en terraplenes debido los posibles asentamientos del terreno.

Por último, resulta también destacable la diferencia en emisiones acústicas. La vía con balasto presenta una buena amortiguación tanto corpórea como aérea ya que emite unos 4 dB menos en el aire que una vía sin balasto. (Estradé J. M., 1991)

A partir de estos datos se empieza a entrever que no existe una opción ideal sino que es necesario analizar las ventajas que cada uno de los sistemas ofrece. Es por eso que a continuación se exponen los principales aspectos favorables y desfavorables de ambos sistemas mostrados en la Figura 33.

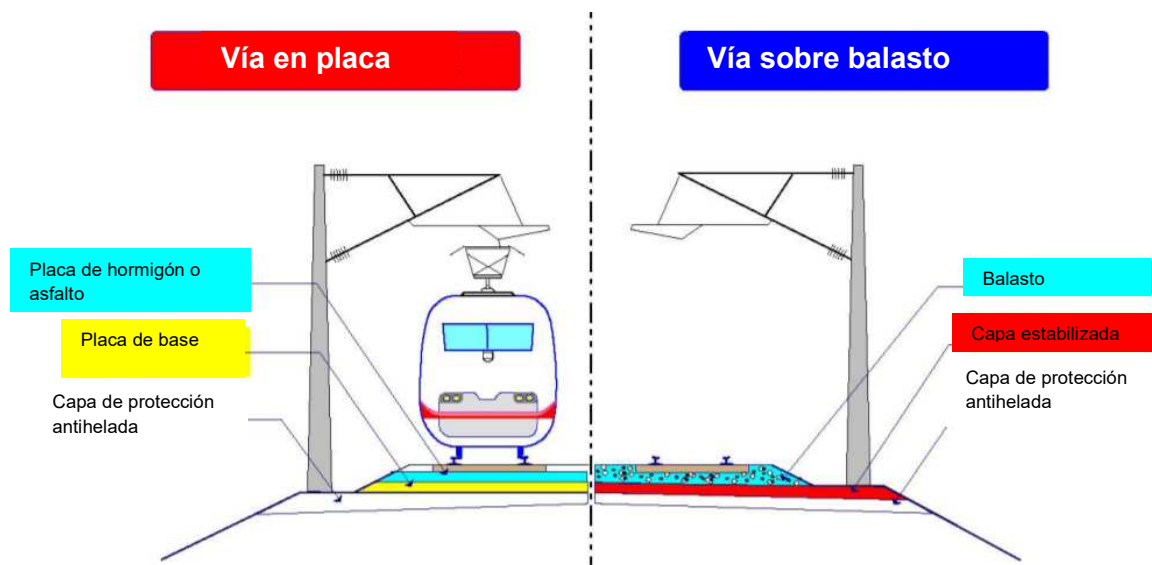


Figura 33: Comparación entre los sistemas de vía
Fuente: W. Sugrue (2013)

Ventajas de la vía en placa

1. Requiere pocas operaciones de mantenimiento lo que origina una mayor capacidad de la línea debido al menor número de interrupciones del tráfico. Además, reduce los costes derivados de estas operaciones hasta tan solo un 10-15% del presupuesto necesario para el mantenimiento de vías con balasto. El nivel de mantenimiento se reduce hasta entornos del 50%, sustituyendo operaciones pesadas de bateo y posterior estabilizado por pequeñas y normalmente rutinarias inspecciones del carril, sus soldaduras y el sistema de sujeción.
2. Permite reducir el volumen de excavación en los túneles y la sobrecarga permanente en los puentes y viaductos posibilitando la construcción de soluciones estructurales más aligeradas. La cota de la vía sin balasto puede reducirse de 250 a 350 mm en comparación con la superestructura de balasto.
3. Presenta una mayor resistencia transversal. Este hecho posibilita un mayor peralte en las curvas y por lo tanto, una reducción del radio mínimo de 5.000 a 2.500 m para velocidades de 250 km/h.
4. Elimina el problema del vuelo del balasto que causa daños en las vías y en el material rodante.
5. Es posible aumentar la distancia media entre los desvíos necesarios para las operaciones de mantenimiento así como reducir otras infraestructuras necesarias en el caso de las vías con balasto.

6. Facilita el acceso a las vías en caso de emergencia tanto por parte de los peatones como por los equipos de rescate.
7. La rigidez de la placa favorece la estabilidad geométrica del sistema a lo largo del tiempo, contrariamente a las frecuentes deformaciones y desplazamientos que pueden producirse en la superestructura de la vía sobre balasto. Se presentan menores esfuerzos en los carriles debido a una mejor geometría y además, las características de la vía en placa permiten una mejor distribución de las cargas estáticas y dinámicas sobre el terreno.
8. Permite el uso del freno por corrientes de Foucault. Principalmente los trenes frenan mediante dicho freno en las estaciones y en el caso de la vía con balasto se presentan problemas debido al calentamiento del carril. La vía en placa permite el frenado en distancias más cortas compatibles con niveles de confort y aceleraciones percibidas por el viajero.
9. Puede aplicarse un mayor peralte sin afectar al deterioro geométrico de la vía y así proporcionar una mayor flexibilidad de trazado. De esta manera, se evita la construcción de muchos túneles y una menor ocupación que se traduce en una mejor integración ambiental.
10. La alineación de la vía se mantiene constante durante toda su vida útil. Se prevé un ciclo de vida de unos 60 años lo que representa prácticamente el doble que la vía convencional.
11. Gran confort para el viajero gracias a la estabilidad geométrica de la vía.
12. No presenta problemas de control de la vegetación lo cual es absolutamente necesario en la superestructura con balasto.

Debe destacarse que para que se den las ventajas mencionadas respecto al mantenimiento es necesario un correcto diseño de la superestructura.

Inconvenientes de la vía en placa

1. Mayores costes de implantación que en la vía tradicional a no ser que se instale en túneles o puentes. Requiere estudios de viabilidad económica teniendo en cuenta los costes de implantación, mantenimiento y renovación de componentes para una vida útil determinada.
2. Presenta una menor flexibilidad para modificar el diseño una vez instalado así como la aplicación de innovaciones tecnológicas. Es por eso que su construcción debe realizarse de forma muy precisa.
3. La mayor rigidez de la vía en placa favorece la emisión de ruido y la transmisión de vibraciones. Para asegurar que los niveles de ruido no sean mayores que en la vía en placa deben implantarse medidas de reducción sonoras. En el caso de no hacerlo, la vía en placa produciría unos 4 dB más que la vía tradicional.
4. Las reparaciones derivadas del posible descarrilo resultan más costosas e implican mucho tiempo.
5. Presenta poca adaptabilidad a grandes asientos de los terraplenes. De hecho se requiere un terreno homogéneo que no sufra asientos o que estos sean muy pequeños (<30 mm). Deben pues realizarse tratamientos costosos y normalmente se limita su uso en terraplenes con una altura menor a 9 metros.
6. Necesidad de construcción de varias capas de protección contra las heladas y la dotación de un desagüe impecable.

7. Operaciones de mantenimiento como la eliminación de defectos del carril y de la superficie de rodadura por amolado son también necesarias para la vía en placa. Es previsible además, que se desarrollen en ella en un tiempo considerablemente mayor los defectos locales de abolladuras en las soldaduras o en las juntas aislantes del carril.
8. Debe tenerse en cuenta la aparición de asientos en tramos cortos al pasar de infraestructura de terraplén a viaducto o túneles, es decir en las transiciones. También en las zonas de mayor longitud como consecuencia de asientos regulares del subsuelo.
9. Es necesario tomar medidas para evitar las fisuras en la placa ya que la rotura de esta ocurre de forma repentina e imprevisible.
10. Si se quieren realizar modificaciones en la posición y elevación, solo son posibles si se realiza una gran cantidad de trabajos.

Ventajas de la vía con balasto

1. Costes de construcción menores que en el caso de vía en placa.
2. El balasto permite la amortiguación de las vibraciones gracias a su elasticidad y garantiza también el drenaje y evacuación de las aguas.
3. Ofrece la posibilidad de modificar la situación de la vía sin causar problemas a la explotación mediante la adaptación de peraltes en curva y rampas de transición una vez construida.
4. Los procedimientos de conservación están acreditados y avalados por la experiencia. Además se tiene un amplio conocimiento de las problemáticas que este sistema presenta y de las posibles soluciones.
5. Permite efectuar trabajos de mantenimiento limitando la velocidad y a la vez conservar parte de la capacidad de transporte. El mantenimiento de la geometría presenta además un bajo coste y puede realizarse durante la noche sin afectar a la circulación de los trenes.
6. La maquinaria de ejecución de vía con balasto permite mayores rendimientos de ejecución en torno a los 200 m al día.
7. El balasto es autorreparable, es decir, se va adaptando a nuevas formas geométricas. Además, la regulación en altura en caso de asientos resulta simple.
8. Presenta una gran capacidad de adaptación para uniones de vía.

Inconvenientes de la vía con balasto

1. El balasto se deteriora progresivamente con el paso de los trenes y se producen asientos diferenciales que aparecen particularmente en terrenos débiles y con un drenaje deficiente.
2. Hasta ser estabilizada, la vía con balasto presenta una resistencia lateral limitada tanto sin carga (por esfuerzos de tipo térmico) como cargada.
3. A altas velocidades puede producirse el vuelo del balasto que al levantarse origina daños de diversa consideración en los bajos y laterales del tren, en el carril, ruedas así como en otros elementos.
4. La superestructura tiene mayor altura, peso y anchura que la vía en placa. Este hecho conlleva una mayor ocupación en planta en obras de tierra, mayores

- volúmenes de excavación en caso de túneles y un mayor peso en los viaductos.
5. El balasto es un recurso limitado y a veces puede que no sea factible su transporte debido a su coste. Para asegurar un buen comportamiento de la vía es imprescindible disponer de balasto de calidad y puede implicar grandes costes de transporte.
 6. Presenta una resistencia lateral limitada por lo que la insuficiencia o exceso de peralte provocan un gran deterioro de la geometría.
 7. Puede producirse contaminación del balasto por finos procedentes del terreno o de la abrasión del mismo balasto.
 8. En obras de túnel o viaducto en las que el balasto se encuentra encapsulado lateralmente y sobre un lecho de hormigón se deben disponer almohadillas de mayor elasticidad para compensar este efecto.
 9. El bateo y las operaciones de mantenimiento resultan ruidosas y generan mucho polvo.

A partir de esta información pueden obtenerse diversas conclusiones en relación a la implantación de la vía en placa. En primer lugar, no es aconsejable la instalación de la superestructura sin balasto en una vía que se encuentra en servicio ya que implicaría una interrupción total de la circulación de más de 30 días por km de vía. Por lo tanto, la vía en placa solo puede plantearse en el ámbito de las nuevas líneas en construcción, y especialmente en las de alta velocidad. Resulta pues una solución competitiva respecto a la tradicional para la construcción de nuevas líneas con las siguientes características: (Estradé J. M., 1991)

- Túneles de gran longitud.
- Líneas con gran cantidad de obras de fábrica como túneles, puentes y viaductos.
- Líneas con mucha densidad de tráfico o con tráfico simultáneo de viajeros y mercancías.
- Líneas que provocan un fuerte impacto ambiental, y que para evitarlo, la directriz de la línea debe de adaptarse lo mejor posible al terreno, reduciendo sus radios mínimos.
- Líneas a las que se les aplican valores límites a su trazado, aproximando el peralte de las curvas a límite de explotación admisible y que están sometidas a tráfico pesados (tráfico no homogéneo).
- Velocidades mayores a 250 km/h.
- Estaciones.

A continuación se presenta en la Tabla 8 un resumen donde aparecen los principales parámetros considerados en la comparación de ambos sistemas aunque finalmente son los estudios comparativos de rentabilidad los que deben determinar la elección de la superestructura de balasto o de vía en placa.

PARÁMETROS	VÍA EN PLACA	VÍA CON BALASTO
Supresión de cargas	✓ Buena absorción de las fuerzas de cizalladura y longitudinales de los carriles. ✓ El paso a grandes velocidades no altera la geometría de la vía.	✗ Limitada resistencia lateral. ✗ Deterioro de la geometría de la vía con el paso de los trenes a distintas velocidades.
Correcciones geométricas	✗ Solo pueden corregirse de forma sencilla asientos del orden mm	✓ Facilidad de corrección de los asientos
Parámetros del trazado	✓ Permite diámetros de curvatura mínimos menores por lo que presenta una mejora adaptación al terreno. ✗ No resulta sencillo realizar cambios en la geometría y en el esquema de vías.	✓ Posibilita modificaciones de la situación de la vía. ✗ Admite peraltes menores y ofrece menor adaptación al terreno.
Altura del plano de la vía	✓ Se puede reducir la sección de los túneles(-10 m ²) y la placa superior del tablero de los puentes	✗ Requiere mayor espesor de sección transversal.
Comportamiento en marcha de los vehículos	✓ No se han constatado diferencias en el comportamiento para v< 250 km/h. ✗ Se debe procurar introducir el menor número de saltos en la rigidez de la plataforma.	✗ El balasto se deteriora con el aumento de la velocidad. ✓ Escasa incidencia por las variaciones de rigidez de la plataforma.
Utilización del freno por corriente de Foucault	✓ El aumento de la temperatura del carril no plantea problemas.	✗ Necesario introducir entalladuras de seguridad. Dificultad en la absorción de los esfuerzos originados por el calentamiento del carril.
Emisiones sonoras	✗ Debe de estar provista de material absorbente adecuado.	✓ Buena amortiguación.
Proyecciones de balasto	✓ Quedan descartadas.	✗ Puede aparecer para velocidades superiores de 300 km/h.
Mantenimiento periódico	✓ Pequeñas medidas de mantenimiento y período de 50-60 años de vida útil. ✗ No existen métodos mecanizados para su renovación con tiempos mínimos de bloqueo.	✗ Procedimientos de mantenimiento acreditados. ✓ Menor vida útil, 30-40 años.
Disponibilidad	✓ Disponibilidad del servicio extremadamente alta para la producción de tráfico. ✗ Peligro de interceptación desproporcionada durante su renovación.	✓ Intervalos reducidos para su renovación y mantenimiento.
Rentabilidad	✗ Costes de implantación elevados, deben mecanizarse los procesos de montaje.	✓ Costes de instalación menores que los de vía en placa.

Tabla 8: Parámetros comparativos entre la vía en placa y con balasto.

Fuente: J.M. Estradé (1998)

Con todas las características expuestas es posible dar un paso más en el estudio y analizar las tipologías de placa existentes actualmente. Es por eso, que en el siguiente apartado se pretende resumir las características técnicas así como los elementos constitutivos de cada uno de ellos.

10.2. Tipologías de vía en placa

Cabe destacar que existen numerosas clasificaciones para los sistemas de vía en placa. Este hecho es debido a los distintos criterios que pueden adoptarse como por ejemplo el número de elementos elásticos o bien sus elementos constitutivos.

La primera distinción que puede hacerse respecto a sus elementos constitutivos hace referencia al tipo de sujeción que será continua o discreta. En el primer tipo, el carril se encuentra sujeto en toda su longitud mientras que en el segundo, el carril se encuentra sujeto de forma puntual en una distancia de separación entre sujeciones fijas.

Dentro de estas dos grandes categorías se pueden distinguir a su vez varias subcategorías. Se presenta a continuación la Tabla 9 que resume y clasifica los sistemas de vía en placa en dichas subcategorías.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VÍA EN PLACA					
Sujeción continua		Sujeción discreta			
Carril embebido	Carril enchaquetado	Traviesas o bloques hormigonados	Traviesas o bloques sobre hormigón o asfalto	Losas prefabricadas	Monolíticos
Edilon	CDM	Rheda	ATD	Shinkansen	Lawn Track (Rasengleis)
BBERS	ERL	Züblin	BTD	BÖGL	FFC
	SFF	Stedef	SATO	ÖBB-Porr	Hochtief
		Sonneville-LVT	FFYS	IPA	BES
		Heitkamp	Getrac		BTE-BWG/HILTI
		SBV	Walter		PACT
		Walo			

Tabla 9: Clasificación de los sistemas de vía en placa
Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

Seguidamente se describen los sistemas más usados en el momento.

10.2.1. Sistemas de carril embebido

Este sistema se basa en la introducción del carril en la superficie de apoyo, es decir, el carril se adhiere mediante elastómeros a unas canaletas de hormigón o acero de la placa principal. En la Figura 34 se muestra el concepto de diseño donde en rojo se resalta el elemento elástico que además tiene la función de transmitir esfuerzos del carril a la losa y atenuar las vibraciones.

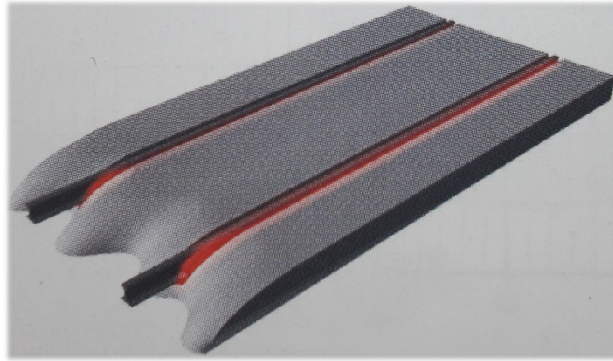


Figura 34: Esquema del sistema de carril embebido
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

Esta solución es aplicable a todo tipo de ferrocarriles, desde los trenes ligeros y tranvías hasta los de alta velocidad.

La ventaja principal de esta solución es la eliminación de flexiones del carril entre apoyos de traviesas o bloques, la reducción del ruido y un menor mantenimiento que otras soluciones de vía en placa. Además, estos sistemas permiten la circulación de vehículos de emergencia por la superestructura, hecho que puede resultar de interés sobre todo en túneles de gran longitud. Sin embargo, el mayor inconveniente es la gran precisión que se necesita en la construcción de la placa y las acanaladuras ya que la corrección de errores en planta o alzado es casi imposible sin picar la placa. (González, 2010)

Se presentan a continuación dos modelos de dicho sistema habituales en las líneas de alta velocidad y las ventajas e inconvenientes que presentan.

10.2.1.a. Edilon

Este sistema fue desarrollado en 1972 por la empresa holandesa Edilon-sedra en colaboración con los Ferrocarriles Holandeses (NS). Se ha aplicado en Holanda en el sistema de trenes ligeros así como en 100 km del metro de Madrid. No se aplicó en alta velocidad hasta la construcción de un tramo de pruebas cerca de la ciudad de Best (Holanda). En la actualidad puede encontrarse por ejemplo en las estaciones de alta velocidad de Atocha (Madrid) y en la de Toledo tal y como se muestra en la Figura 35.



Figura 35: Sección de vía con sistema Edilon utilizada en la estación de Toledo
Fuente: ADIF (2017)

La principal característica como ya se ha mencionado es la carencia de traviesas por lo que el carril queda apoyado en toda su longitud.

El sistema pues está formado por una placa de hormigón armado ejecutada in situ en la cual se crean dos entalladuras donde se colocan posteriormente los carriles junto con tubos para aligerar el volumen del elastómero con el que se recubre el carril. En este caso, el elastómero usado es el Corkelast, un compuesto de polímero endurecido que contiene diferentes materiales de relleno como por ejemplo corcho, dependiendo del tipo de aplicación exigida. El material de relleno sirve para reducir el uso del material elastomérico al igual que los tubos de PVC que además se pueden usar para encerrar los cables de señales. (Esveld, 1997)

En la Figura 36 pueden observarse los distintos componentes del sistema Edilon.

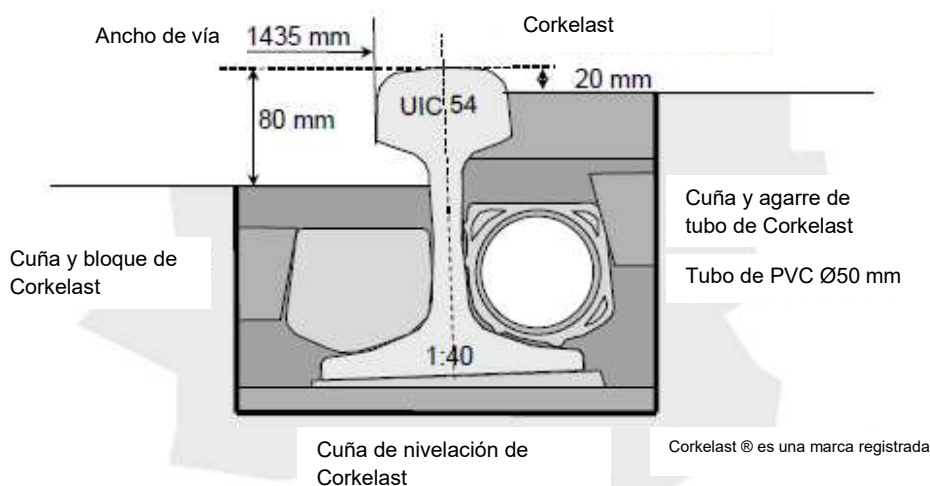


Figura 36: Detalle de los componentes del sistema Edilon
Fuente: C. Esveld (1997)

Ventajas

- **Reducción del espesor de la superestructura** desde la base de la placa de la cabeza de carril. Este hecho permite una reducción apreciable del diámetro de perforación de los túneles, de la profundidad de excavación en soterramientos y de los cantos de los tableros de las obras de paso ferroviarias. El carril embebido no precisa de un espesor de placa donde recibir o alojar las fijaciones o bloques de soporte del carril.
- **Reducción de los niveles de ruido y vibraciones.** La fuente principal de ruidos del carril es la vibración del alma. Gracias a la cobertura que ofrece el Corkelast, se amortigua o elimina su vibración y en consecuencia la emisión de ruido.
- **Muy bajo coste de mantenimiento.** La ausencia de fijaciones elimina totalmente el tiempo empleado en este tipo de mantenimiento. El hecho de que el carril esté apoyado de forma continua elimina las tensiones y esfuerzos de fatiga que sobre el carril aparecen como consecuencia de los vanos entre los soportes discontinuos tradicionales. Además, la adherencia continua del carril reparte las

tensiones y esfuerzos que pueden aparecer de una manera mucho más uniforme a lo largo del carril.

- **Posibilidad de tránsito de vehículos sobre la superestructura.** La superficie superior de la placa puede enrasarse con el nivel de la cabeza del carril permitiendo así la circulación de vehículos sobre neumáticas ya sea para tareas de mantenimiento como para emergencias.
- **Resistencia eléctrica muy alta.**
- **Posibilidad de ajuste de la flexibilidad.** El Corkelast se puede fabricar con diferentes módulos de elasticidad y así conseguir una vía flexible en sentido vertical y más rígida en el sentido transversal.

Inconvenientes

- **Elevado coste del elastómero Edilon Corkelast.**
- **Reparaciones costosas.** Resulta difícil o prácticamente imposible la corrección de los errores de alineación y nivelación una vez construido el sistema. Las posibles reparaciones conllevan grandes interrupciones en el normal funcionamiento de la línea.
- **Dificultad de ejecución.** Se necesita gran precisión en la construcción de las placas y acanaladuras. Además, se requiere doble nivelación, una para las acanaladuras y la otra para el carril.

10.2.1.b. BBERS

Las siglas BBERS hacen referencia a Balfour Beatty Embedded Rail System, es decir, sistema de carril embebido de Balfour Beatty.

Se trata de un sistema desarrollado por la compañía Balfour Beatty Rail concebido por Charles Penny, su director. Por el momento no se ha aplicado en ninguna línea de alta velocidad comercial pero sí en tramos de prueba. (Balfour Beatty, 2006)

De hecho, el sistema BBERS se implantó en Beeston (Inglaterra) y posteriormente en el año 2002 en Medina del Campo (España) tal y como puede verse en la Figura 37 donde se constató un buen comportamiento del sistema.



Figura 37: Sistema BBERS en Medina del campo
Fuente: Balfour Beatty (2006)

Las diferencias respecto al carril embebido tradicional son fundamentalmente que el carril se puede extraer y desmontar de forma más sencilla y que tiene una vida útil mayor.

El sistema se basa en el mismo funcionamiento que el carril Edilon pero es evidente la diferencia existente en el carril ya que presenta una geometría completamente rectangular y es también de un tamaño más reducido al igual que la entalladura ejecutada en la placa principal. No obstante, existe espacio suficiente para la introducción de una almohadilla elástica entre el carril y la carcasa la cual a su vez le proporciona sujeción tal y como puede verse en la sección presentada en la Figura 38.

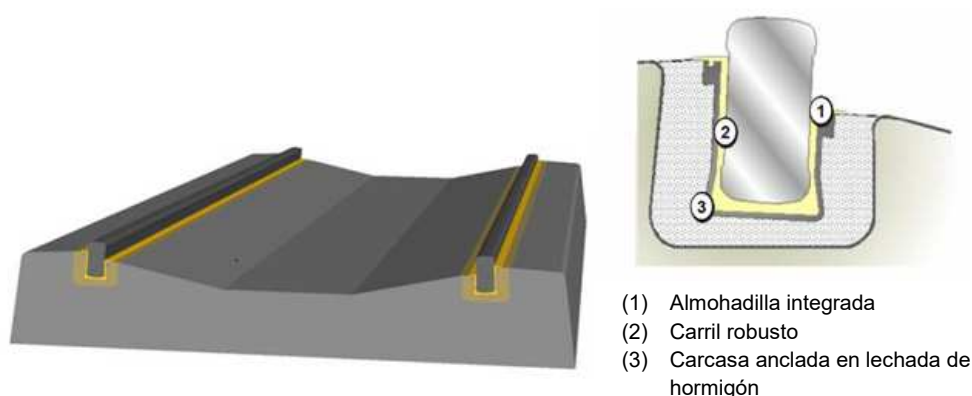


Figura 38: Sección tipo y componentes del sistema BBERS
Fuente: Balfour Beatty (2006)

Entre la carcasa en forma de U y la entalladura se dispone de lechada de hormigón. La simplicidad del sistema permite que pueda construirse in situ o bien prefabricado.

Esta tipología de carril presenta de entrada las mismas ventajas e inconvenientes que el sistema Edilon debido a las similitudes que presentan. Sin embargo, ya que su uso es por ahora experimental y se encuentra en fase de desarrollo y pruebas, no puede aún ahondarse en este aspecto.

10.2.2. Sistemas de carril enchaquetado

Los sistemas de carril enchaquetado resultan bastante similares a los de carril embebido. Se diferencian en que el carril en este caso se encuentra totalmente envuelto, “enchaquetado”, por un material elástico que evita cualquier contacto con la placa principal. Este material suele obtenerse a partir de caucho reciclado de neumáticos usados y resina de matriz polimérica con el objetivo de reducir los niveles sonoros del paso de los vehículos. Se puede observar en la Figura 39 una sección tipo de esta tipología de sistemas.

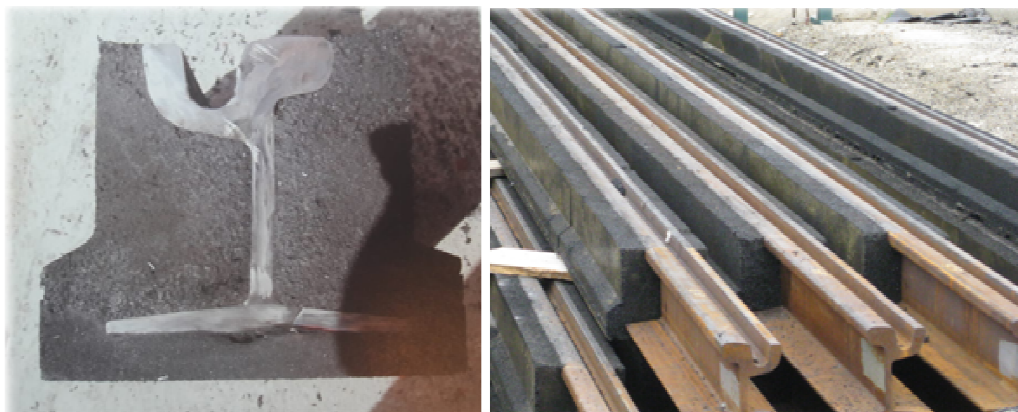


Figura 39: Sección tipo de carril enchaquetado
Fuente: R. Cortinat, J. D. García, J. Gómez et al (2009)

La puesta en obra se realiza en dos fases independientes que son, por un lado el encamisado de carriles propiamente dicho y por otro lado, la colocación en la vía de los carriles ya encamisados. Cuando los carriles ya han sido encamisados son llevados a la vía, donde después de soldarlos entre sí y realizar el remate del encamisado, se colocan en su posición definitiva utilizando una serie de pórticos como los de la Figura 40 que permiten dotar a la vía de las características geométricas exigidas. Con los carriles colocados en su posición definitiva se procede a hormigonar y tanto carril como chaqueta quedan recubiertos de hormigón. (Cortinat, García, Gómez et al, 2009)



Figura 40: Proceso de hormigonado donde se aprecian los pórticos de nivelación
Fuente: Sistema MLG

Esta tipología de vía en placa no tiene por ahora aplicación en el ámbito de la alta velocidad sin embargo, se está usando en metros y tranvías como por ejemplo en el tranvía de Granada.

10.2.3. Sistemas de traviesas o bloques hormigonados

Este sistema se basa en el hecho que los bloques de hormigón o traviesas se encuentran directamente embutidos en la losa de hormigón de la placa principal. Se trata de un sistema relativamente rígido en el cual es muy importante la nivelación geométrica del carril antes de hormigonar ya que posteriormente resulta difícil realizar correcciones.

Se presentan en la Figura 41 los esquemas de este sistema donde en rojo pueden apreciarse dos configuraciones para introducir el material elástico.

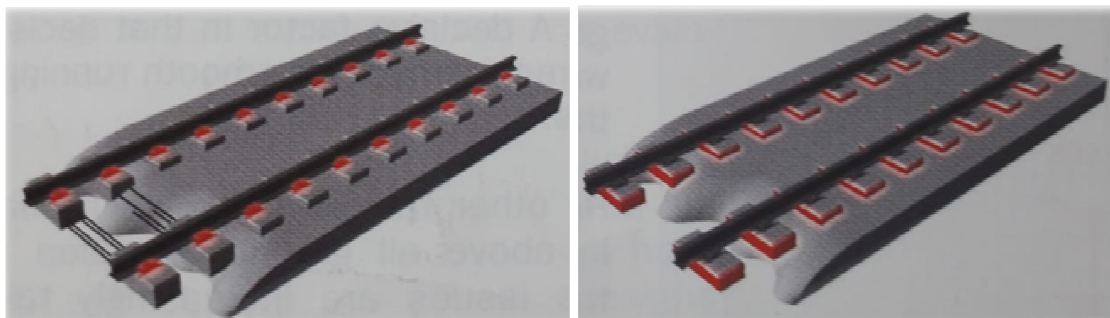
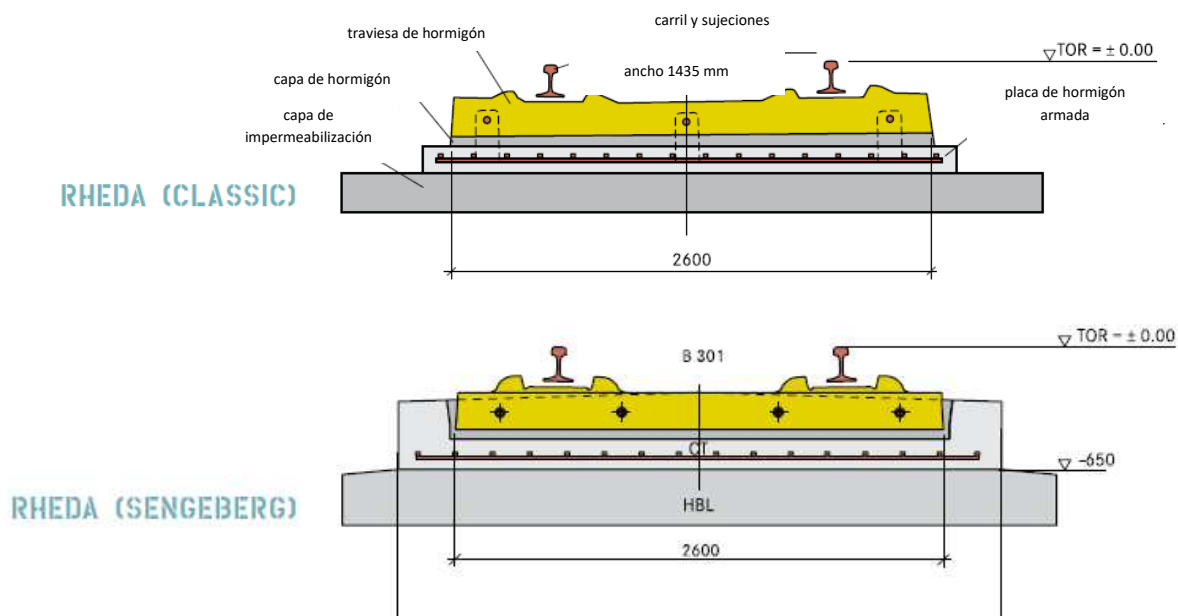


Figura 41: Esquema de sistema de bloques/traviesas hormigonados
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

10.2.3.a. Rheda

El sistema Rheda es un sistema desarrollado en Alemania y presenta diversas variantes debido a los cambios que se fueron aplicando a los primeros modelos para suplir sus deficiencias tal y como puede observarse en la Figura 42.



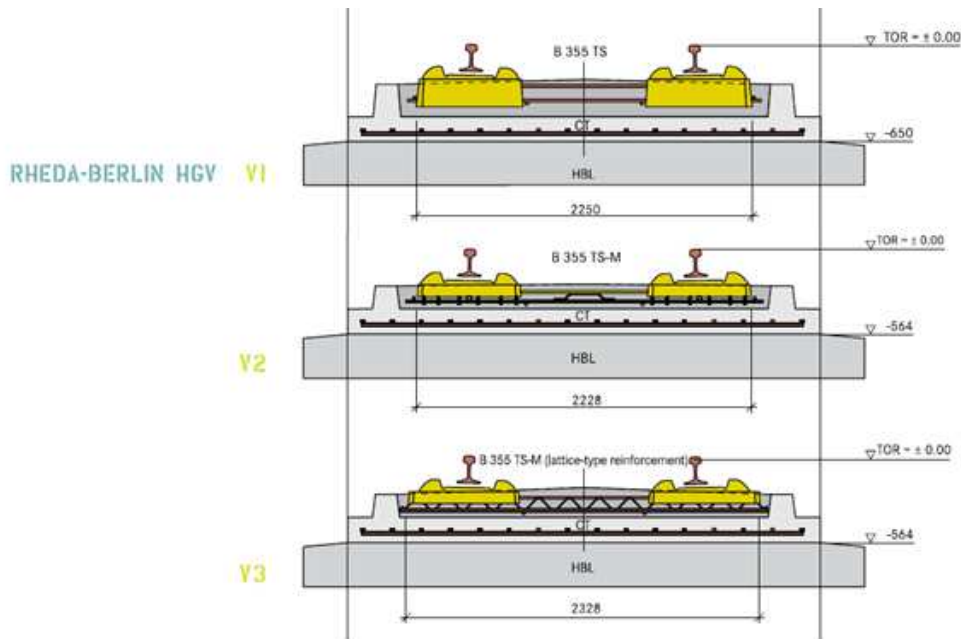


Figura 42: Evolución del sistema Rheda antes de llegar al actual
Fuente: Rail One (2011)

El modelo clásico de Rheda se implantó ya en 1972 en la línea entre Bielefeld y Hamm (Alemania), concretamente en la estación de Rheda. Después de años en pruebas en 1993 se tendieron 250 km con dicho sistema. Actualmente está homologado por la EBA, organismo competente en temas de ferrocarriles en Alemania y puede encontrarse en líneas como la HSL Zuid que conecta Ámsterdam y Rotterdam.

El sistema se compone de traviesas bloque modificadas que se integran en una estructura monolítica de hormigón ejecutada in situ. Se trata de traviesas tipo B 355-M formadas por dos bloques unidos mediante una vía de celosía de barras de acero corrugado. A su vez las traviesas disponen de orificios por donde se coloca la armadura longitudinal con el objetivo de proporcionar continuidad mecánica y rigidez. (Rail One, 2011)

El proceso constructivo se basa en una primera fase de alineación y nivelación, seguida del hormigonado y desclavado. Una vez el hormigón ha adquirido consistencia, se desclava el tramo para evitar que el carril induzca esfuerzos sobre las traviesas y aparezcan grietas en la losa. El posicionado del carril se realiza mediante husillos y tornillos, y para mantener estable la parrilla de la vía hasta que el hormigón empieza a fraguar es necesario colocar unas piezas metálicas soldadas a pernos salientes de la losa inferior de hormigón como las que se pueden ver en la Figura 43.



Figura 43: Proceso constructivo de regulación del ancho de vía y peralte
Fuente: CONSTRUBLOG

Sobre las traviesas se disponen placas intermedias elásticas de poliéster para reducir su rigidez. Las sujeciones usadas son las Vossloh 300 que permiten que se alcance la deflexión vertical de la vía necesaria, consiguiendo así una adecuada distribución de la carga y garantizando con ello un confort de conducción óptimo. Esta sujeción proporciona elasticidad a la vía gracias a una almohadilla de elevada elasticidad y un clip con gran resistencia a la fatiga.

Puede observarse la sección tipo con los componentes en la Figura 44.

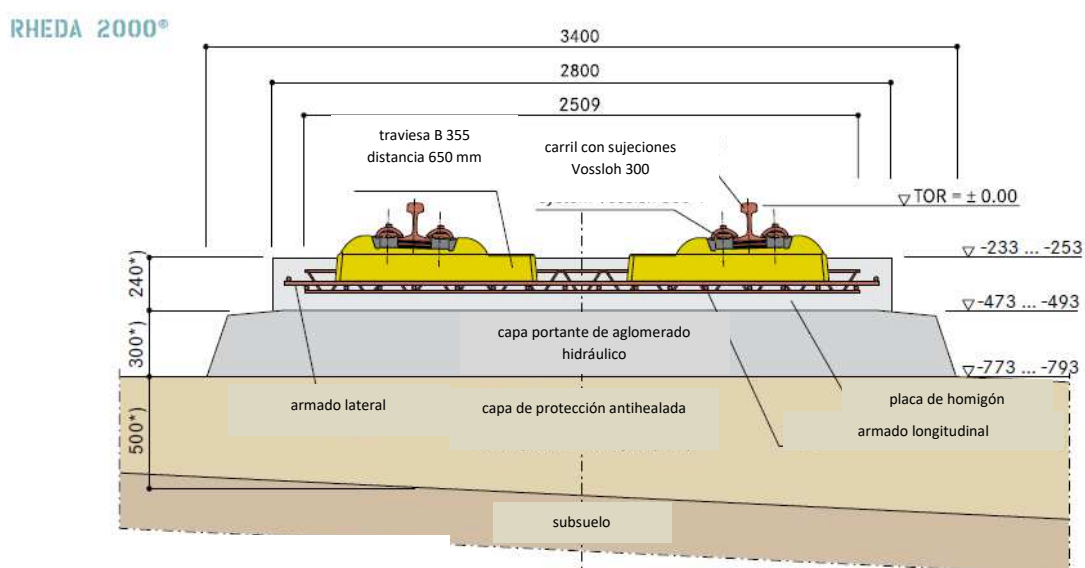


Figura 44: Sección tipo Rheda 2000
Fuente: Rail One (2011)

Ventajas

- **Rendimientos altos de construcción.** Puede mecanizarse prácticamente la totalidad del proceso constructivo y su montaje resulta así más sencillo.
- **Posibilidad de corregir el posicionamiento de la vía en alzado.** Se consigue tanto a través del sistema de sujeción del carril como durante el proceso de construcción.
- **Gran adaptabilidad.** Gracias al hormigonado en obra de la plataforma de la vía es compatible con cualquier tipo de infraestructura.
- **Experiencia dilatada en líneas de alta velocidad.**
- **Tecnología apta para desvíos y transiciones con balasto.** (Rail One, 2011)

Inconvenientes

- **Imposibilidad de mecanizar algunos procesos.** La introducción de la armadura que pasa a través de las traviesas y hormigón de relleno no se puede mecanizar.
- **Dificultad de reparación.** El cambio de traviesas exige el corte de la línea durante cierto tiempo e implica intervención en la losa principal.
- **Ruido y vibraciones.** Resulta difícil colocar elementos que absorban ruido y vibraciones debido al espacio disponible.

10.2.3.b. Züblin

El sistema Züblin se empezó a desarrollar a finales de los años setenta, también en Alemania. Este se basa en traviesas monobloque o bibloque embutidas en la losa de hormigón fresco y no es como en el sistema Rheda donde el hormigón se introducía entre las traviesas con el emparrillado de vía tendido. Las traviesas se introducen a presión y mediante vibración cuando el hormigón se encuentra aún fresco.

El diseño básico presenta un espesor de 24 cm y 2,8 m de ancho tal y como puede observarse en la Figura 45.

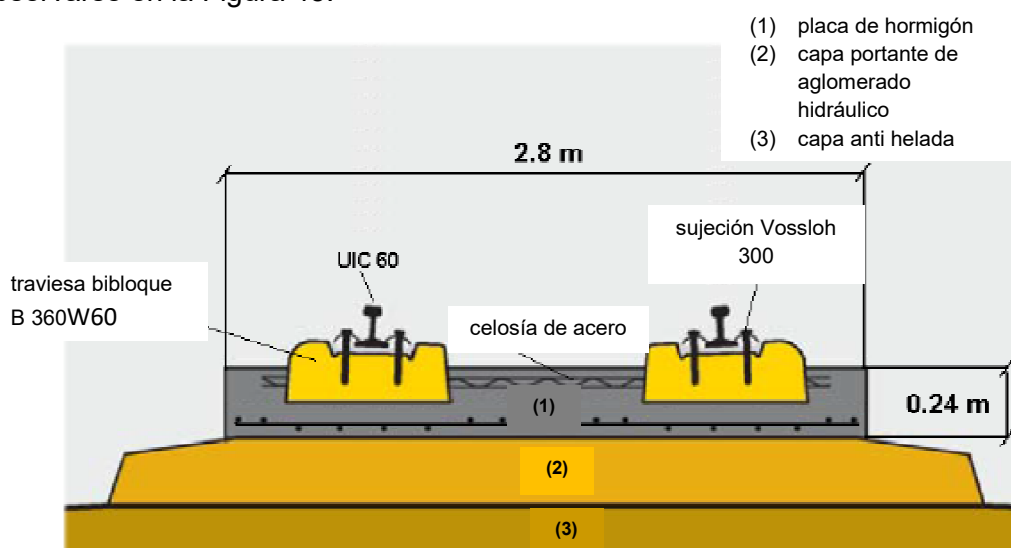


Figura 45: Sección tipo Züblin
Fuente: Züblin

Los dos bloques individuales de hormigón armado se encuentran conectados por una celosía de acero para formar una traviesa bloque. Las barras de armado garantizan no solo una geometría precisa durante la instalación, sino que proporcionan a las traviesas un anclaje adicional al hormigón. La geometría de las traviesas está diseñada para las sujeciones Vossloh pero pueden adaptarse a otros tipos.

El proceso constructivo se basa en los siguientes pasos:

- Preparación y construcción de la subbase.
- Armado, hormigonado y compactado de la losa de hormigón.
- Colocación exacta de las traviesas con las fijaciones premontadas mediante vibración en el hormigón ya compactado pero no fraguado.
- Instalación de los carriles.

La instalación es llevada a cabo por maquinaria especializada como la que se muestra en la Figura 46.



Figura 46: Hormigonado y posicionamiento de traviesas
Fuente: Züblin

Ventajas

- **Rendimiento alto.** La mecanización del proceso permite una rápida ejecución.
- **Flexibilidad.** El hecho de hormigonar in situ permite ajustar la altura de las traviesas.
- **Posibilidad de corregir el posicionamiento de la vía en alzado.** La corrección es posible a través del sistema de sujeción del carril.
- **Relativamente económico.** Los costes se acercan a los del sistema convencional.
- **Espacio suficiente para introducir elementos reductores de ruido y vibraciones.**
- **Experiencia en alta velocidad.**

Inconvenientes

- **Problemas de ejecución.** Aparecen dificultades cuando deben introducirse las traviesas en peraltes de más de 150 mm.
- **Requiere de un equipo especialmente diseñado para su construcción.** Se limita así su campo de aplicación.

10.2.3.c. Stedef

El sistema Stedef se caracteriza por la disposición de traviesas bloque envueltas lateral e inferiormente por un colchón neumático realizado con un elastómero de estructura celular cerrada, con burbujas microscópicas llenas de nitrógeno que favorecen la amortiguación de vibraciones. Así pues el elastómero tiene la misión de atenuar las vibraciones de alta frecuencia que se transmiten por el propio carril y además se encarga de mantener sujeto el carril a la traviesa. La absorción de bajas frecuencias en cambio se realiza en el nivel inferior de elastómero.

Las traviesas trabajan como si estuvieran articuladas, consiguiendo el efecto elástico y de absorción de energía del balasto. Se dispone de diferentes opciones para las sujeciones pero la más usada es el tipo Nabla que permite correcciones verticales de hasta 20 mm y verticales de 15 mm.

El sistema Stedef, que se presenta en la Figura 47, nació en Francia y se ha aplicado en varios túneles de las líneas francesas.



Figura 47: Esquema del sistema Stedef
Fuente: Railtech Sufetra

La particularidad de este modelo reside en que las traviesas no se apoyan directamente sobre la base de hormigón armado sino que se deja un espacio libre entre el recipiente y la traviesa. El proceso de hormigonado de hecho se realiza en dos partes, primeramente se ejecuta la placa principal dejando espacio alrededor del recipiente y posteriormente, se rellena este espacio cubriendo parte de los bloques de la traviesa. En la Figura 48 se muestra el tendido de las traviesas para el posterior hormigonado.



Figura 48: Proceso constructivo del sistema Stedef
Fuente: R. A. Dueñas (2007)

Ventajas

- **Elasticidad garantizada.** Los elementos introducidos ofrecen elasticidad transversal y amortiguación.
- **Montaje sencillo.**
- **Posibilidad de distintos anchos de vía** según el tipo de sujeción usada.
- **Adecuada para entornos urbanos.** La amortiguación de las vibraciones y ruido favorece su colocación cerca de entornos con limitaciones de sonido.
- **Facilidad de reparación.** Pueden extraerse las traviesas sin tener que destruir la placa principal.
- **Limitación de las solicitaciones de la capa soporte.**

Inconvenientes

- **Se requiere de un tratamiento con una base de cemento u hormigón magro** para evitar la erosión producida por el agua que penetra en las juntas.
- **Problemas con el recipiente usado.** Por la falta de estanqueidad puede entrar agua y por lo tanto producir un deterioro importante de la placa hormigón.
- **Dificultad de circulación de los vehículos de emergencia.** Las uniones entre los bloques quedan descubiertas y dificultan el paso de los vehículos. (Dueñas, 2007)

Cabe destacar que después de analizar los puntos débiles que este sistema presenta, surgió el sistema Sateba. Se mejoraba sobre todo el problema del agua en el recipiente introduciendo juntas de poliuretano para evitar los posibles problemas de erosión.

10.2.3.d. Sonneville-LVT

El sistema Sonneville-LVT (Low Vibration Track) es un sistema de vía en placa de bajas vibraciones diseñado por la empresa americana Sonneville.

Se trata de uno de los primeros sistemas de vía en placa que se desarrolló y gracias a su excelente comportamiento se puede encontrar actualmente en más de 1.300 km de vía, incluyendo tres de los cuatro túneles de ferrocarril con mayor longitud. Uno de ellos es el túnel de la Mancha entre Francia e Inglaterra.

Consiste en un sistema muy parecido al Stedef constituido por bloques de hormigón armado que quedan separados de la placa principal por una cazoleta de goma, rodeados por hormigón de relleno no armado. Esta cazoleta contiene en su interior una almohadilla elastomérica. Pueden observarse en la Figura 49 los componentes que dan lugar a este sistema.

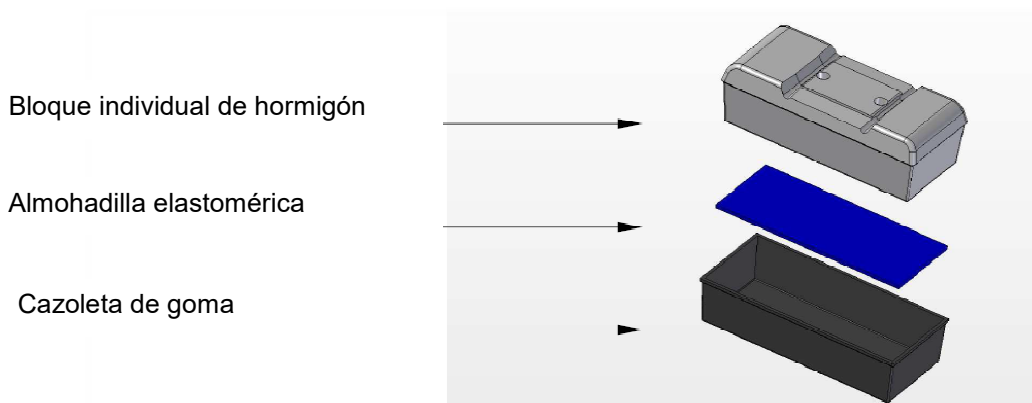


Figura 49: Componentes del sistema Sonneville-LVT
Fuente: Sonneville (2011)

La sujeción de los carriles no precisa de ningún requisito especial, tan solo la colocación de una almohadilla elástica bajo el carril que protege el sistema de las influencias de las frecuencias altas. Por lo que a la almohadilla elástica interior se refiere, está destinada a repartir las cargas igual que el balasto en vías de este tipo y a reducir la influencia de las frecuencias bajas. Estas dos almohadillas elásticas son combinadas conjuntamente para cada proyecto específico y confieren al sistema dos niveles de elasticidad. (Sonneville, 2011)

La principal diferencia que presenta respecto al sistema Stedef es que se elimina la riostra que unía los bloques y para poder mantener la estabilidad del ancho de vía resulta necesario sumergir el bloque en la placa a una profundidad mayor. Esta profundidad de empotramiento le proporciona además una gran estabilidad lateral y permite su implementación en curvas con radios pequeños.

Su instalación se realiza mediante el método “top-down”, colocando los bloques y carriles en su posición final antes de verter el hormigón. El hormigonado de la placa principal se realiza de una sola fase mediante hormigón de calidad B-300 o superior. Los bloques se sustentan por el carril y quedan suspendidos mediante husillos y entibaciones que permiten un correcto posicionado tal y como se muestra en la Figura 50.



Figura 50: Proceso constructivo por el método “top-down”
Fuente: Sonneville (2011)

Existen diversas versiones de este sistema: una versión estándar y una de alta atenuación de las vibraciones. Esta última tiene unos bloques más grandes y una almohadilla interior más blanda que garantizan una reducida frecuencia propia del sistema. Estas dos versiones están también disponibles con un bajo perfil para adaptarse especialmente a las condiciones de gálibos reducidos.

Ventajas

- **Protección eficaz contra las vibraciones y ruido.** El sistema LVT reduce las vibraciones y ruido en todos los niveles de frecuencia gracias a la elasticidad a los dos niveles del sistema.
- **Alta flexibilidad y precisión.** La posibilidad de utilizar diferentes sistemas de fijación del carril así como las diferentes tipologías de bloque permiten su aplicación en diversas situaciones. Además, el procedimiento de instalación ofrece una geometría de la vía muy precisa y con valores del ancho de vía $\pm 0,5$ mm.
- **Facilidad de reparación.** Los componentes son de fácil acceso y pueden ser sustituidos rápidamente sin tener que destruir la placa principal.
- **Procedimiento constructivo sencillo y económico.** Su instalación sigue procedimientos que no resultan complicados, con altos rendimientos y con una alta precisión geométrica. Además, la renovación y mantenimiento de los componentes resulta económica.
- **Gran resistencia lateral.** La profundidad de empotramiento de los bloques ofrece mucha resistencia lateral y control del ancho del carril.
- **Experiencia en alta velocidad.**

Inconvenientes

- **Precisión en el posicionamiento.** Debe colocarse correctamente antes del hormigonado ya que después resulta imposible realizar ajustes del carril en ninguna dirección una vez vertido el elastómero.
- **Requiere de riostras temporales.**
- **Implementación de aparatos de vía.** Su uso resulta complicado aunque se disponen de sistemas para la realización de desvíos.

10.2.3.e. Heitkamp

El sistema Heitkamp se basa en los mismos principios que el sistema Rheda. Sin embargo, en este caso el vertido se llena con grava en vez de hormigón permitiendo el uso de la maquinaria convencional para alinear el carril en la posición predeterminada. Después de establecer una correcta posición del carril, los huecos en el lecho de los áridos se rellenan con una emulsión de cemento. Se pueden observar los detalles de su diseño en la Figura 51.

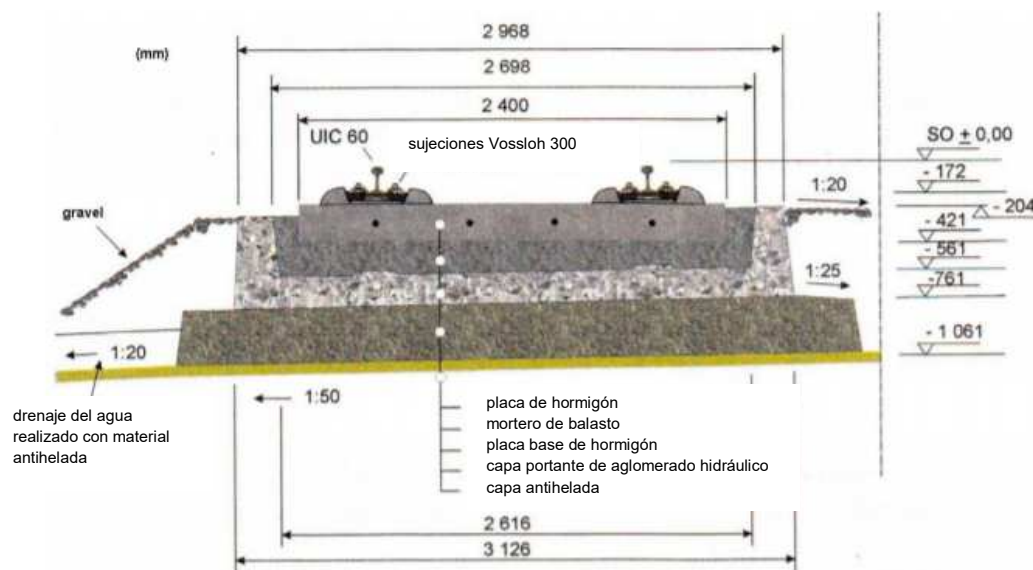


Figura 51: Sección tipo Heitkamp
Fuente: E. Darr (2000)

Como puede observarse se trata de una vía con balasto a la que se le introduce una placa base de conglomerado hidráulico. Sobre la placa se ejecuta una cubeta de hormigón armado en la que se introduce el balasto con la emulsión de cemento.

Su aplicación se remonta al año 1996 cuando se construyó en Alemania un tramo de prueba de 390 m.

Ventajas

- **Atenuación de las vibraciones.** La presencia del balasto permite amortiguar vibraciones y ruido.
- **Proceso de ejecución rápido.** Se obtienen rendimientos altos de construcción.
- **Facilidad de reparación.** Las operaciones de reparación de elementos no resultan difíciles de llevar a cabo. (Michas, 2012)

Inconvenientes

- **Problemas de erosión por el agua.** Cabe la posibilidad que entre agua bajo la cazoleta y provoque problemas con la erosión. También pueden aparecer problemas en ciclos de helada.
- **Requiere material de vía para posicionamiento de traviesas y carril.**

10.2.3.f. SBV (Schwellen mit bitumenverguss)

Las siglas SBV corresponden a traviesas con vertido de asfalto. Este sistema es de origen alemán y presenta la misma técnica constructiva que el sistema Rheda. La vía se sitúa encima de una capa de soporte de asfalto en la posición deseada para luego cubrir las traviesas de mástico bituminoso.

El procedimiento de construcción no está mecanizado y por lo tanto resulta difícil e implica mucho tiempo. El sistema presenta bastantes inconvenientes y la aparición de sistemas de vía en placa que usan asfalto que ofrecen mayor precisión y mejores resultados, ha provocado que el sistema SBV caiga en desuso.

10.2.3.g. WALO

Se trata de un sistema suizo inspirado en el ya explicado Sonneville. Se basa en el uso de bloques en los que se introduce una almohadilla elástica.

Este tipo de sistema se aplica sobre todo en túneles. Pueden apreciarse las similitudes con el sistema mencionado en la Figura 52 donde se presenta una sección de túnel con sistema WALO.

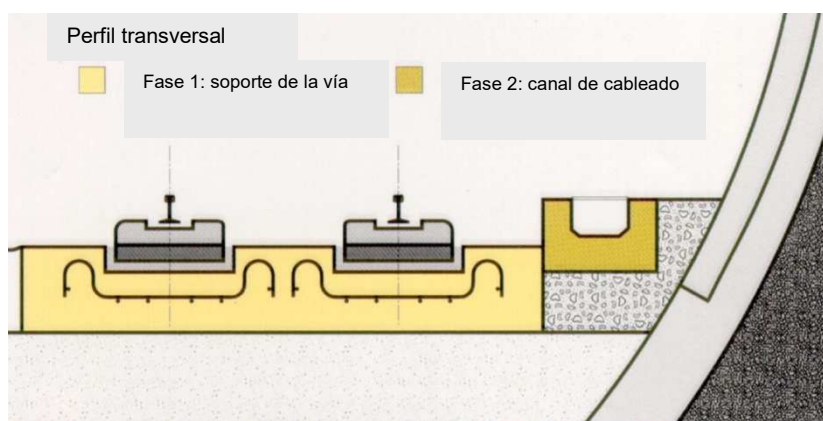


Figura 52: Sección de túnel con el sistema WALO
Fuente: C. Esveld (1997)

Esta tipología de carril presentará pues ventajas e inconvenientes parecidas al sistema Sonneville debido a las similitudes que presentan entre ellos.

10.2.4. Sistemas de traviesas o bloques sobre hormigón o asfalto

Esta solución se basa en disponer las traviesas o los bloques fijados mediante diversos métodos sobre la placa principal pero sin estar embutidos.

La introducción del asfalto proporciona elasticidad, estabilidad y apoyo al sistema.

Se presenta en la Figura 53 un esquema de estos sistemas.

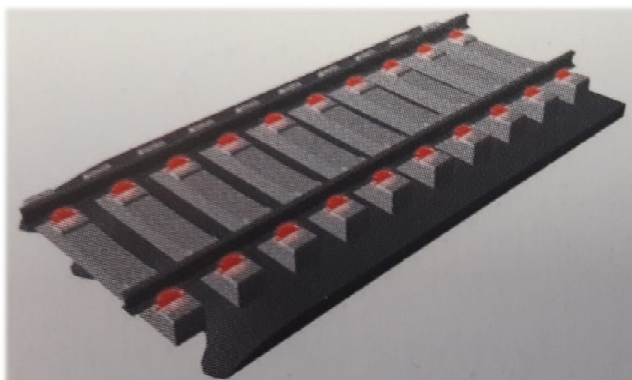


Figura 53: Sistemas con bloques o traviesas sobre hormigón o asfalto
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

10.2.4.a. ATD

El sistema ATD se basa en una placa de soporte de asfalto sobre la cual se deposita directamente la parrilla de la vía. Puede verse un esquema de este tipo de sistema en la Figura 54.

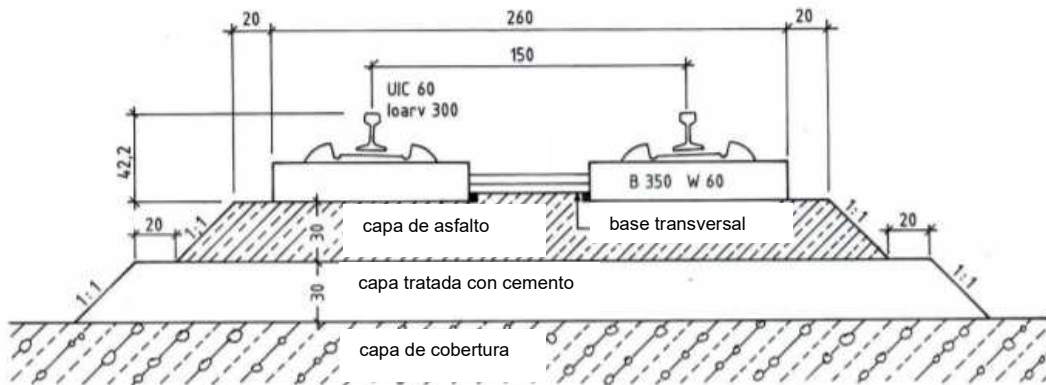


Figura 54: Sección tipo ATD
Fuente: G. Leykauf y B. Lechner (2001)

El paquete de aglomerado asfáltico se compone de 4 capas que en su conjunto tienen un espesor de 30 cm. Las traviesas se colocan casi encajadas sobre un resalto longitudinal que se realiza en la placa de asfalto. Las traviesas monobloque B320 W60 tienen a su vez un entrante en su parte central que encaja en el resalto. El contacto entre traviesa y resalto se sella finalmente con un producto elastomérico que confiere al conjunto estabilidad lateral y longitudinal tal y como puede verse en la Figura 55. (Peña, 2003)



Figura 55: Procedimiento de sellado con elastómero
Fuente: R. A. Dueñas (2007)

Cabe destacar que existen modelos con traviesa monobloque y bibloque con acero entre ellos. Las traviesas monobloque disponen de una acanaladura que permite el encaje con el resalto de la placa principal, en cambio las traviesas bibloque prácticamente encajan en sus extremos interiores con el resalto central de la vía en placa.

El procedimiento constructivo se realiza de abajo a arriba. El posicionado definitivo en planta y alzado queda preestablecido al proceder a la instalación de la capa soporte de asfalto.

Ventajas

- **Proceso de construcción y maquinaria conocidas.** Es posible ejecutar estos sistemas con la maquinaria usual en obras de carretera y vías.
- **Absorción de ruido y vibraciones.** La introducción de material de relleno entre las traviesas permite limitar las vibraciones y el ruido.
- **Rapidez de ejecución.** El asfalto permite circular sobre él poco tiempo después de colocarlo y presenta también un alto rendimiento de ejecución.
- **Alta precisión.** Los distintos avances en este campo han permitido alcanzar una exactitud en alzado de ± 2 mm. (Dueñas, 2007)

Inconvenientes

- **Limitaciones por temperatura.** El sistema no resulta apto para temperaturas superiores a los 50°C ya que el asfalto no resulta estable bajo estas condiciones. Además, el sistema de anclaje ha de ser objeto de un profundo estudio y posterior ensayo en obra para comprobar su comportamiento a bajas temperaturas.
- **Dificultad en desvíos y situaciones especiales.** Resulta complicado implantar este sistema así que deben tomarse medidas especiales u optar por otras tipologías.

10.2.4.b. BTD (BetonTragschicht mit Direktauflagerung)

El sistema BTD presenta similitudes con el ATD descrito anteriormente. Ambos presentan un sistema constructivo basado en fijar la parrilla de la vía sobre una placa soporte. En este caso se sustituye la capa de asfalto por una capa de hormigón tal y como puede observarse en la Figura 56.

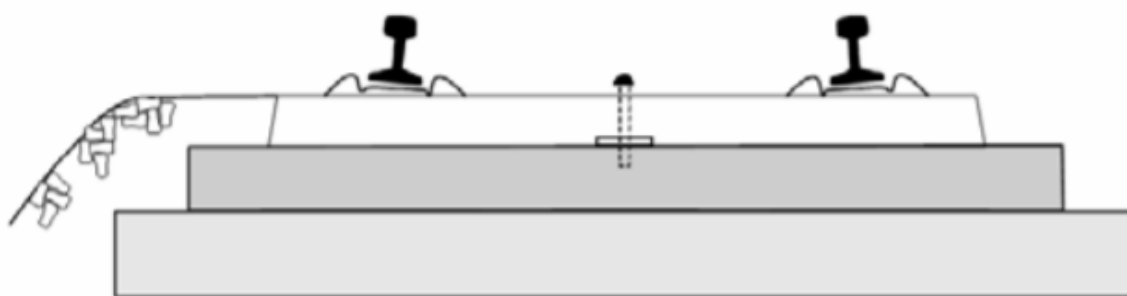


Figura 56: Esquema de sección tipo BTD
Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena

Existen dos versiones de este sistema que se diferencian básicamente por el método en el que las traviesas se fijan sobre la placa base. En el primero de ellos, el anclaje se realiza mediante una abrazadera encajada en la traviesa que corona un anclaje de acero embebido en la placa principal. Es por eso que las traviesas disponen de un espacio central para facilitar la fijación. En cambio en el segundo sistema la sujeción se lleva a cabo introduciendo un anclaje de acero en el espacio central de la traviesa y se aprieta mediante pernos como el mostrado en la Figura 57.



Figura 57: Perno de anclaje del sistema BTB
Fuente: Global Railway Review (2005)

Cabe destacar que el primer sistema de sujeción no proporcionaba demasiada precisión geométrica por lo que dejó de usarse.

Las conexiones entre la traviesa y la placa suelen hacerse en traviesas alternas aunque puede realizarse en todas si el tráfico lo requiere.

Ventajas

- **Proceso de construcción y maquinaria conocidas.** Es posible ejecutar estos sistemas con la maquinaria usual en obras de carretera y vías con unos rendimientos altos de ejecución.
- **Facilidad de reparación de sus elementos.**
- **Alta precisión en planta y alzado.**

Inconvenientes

- **Anclaje traviesas delicado.** La unión de las traviesas a la placa de hormigón puede resultar difícil. Requiere además el diseño especial de las traviesas con un espacio central para posibilitar anclaje.
- **Dificultad en desvíos y situaciones especiales.** Resulta complicado implantar este sistema así que deben tomarse medidas especiales u optar por otras tipologías.

10.2.4.c. SATO

Las siglas SATO corresponden a Studiengesellschaft Asphalt Oberbau, que se traduce como Grupo de Estudio para Superestructura de Asfalto. El sistema SATO consiste en traviesas de acero tipo Y ancladas sobre una capa de soporte de asfalto tal y como puede verse en la transición de la Figura 58.



Figura 58: Transición entre vía sobre balasto y el sistema SATO
Fuente: L. Izvolt (2014)

Las traviesas se sueldan a una superficie plana de acero en el tramo del riel de asfalto, usando los anclajes Nelson de modo que las traviesas se sujeta en dirección vertical y horizontal.

Se muestra también en la Figura 59 un esquema de la sección tipo del sistema SATO en la que se pueden ver los elementos que lo componen.

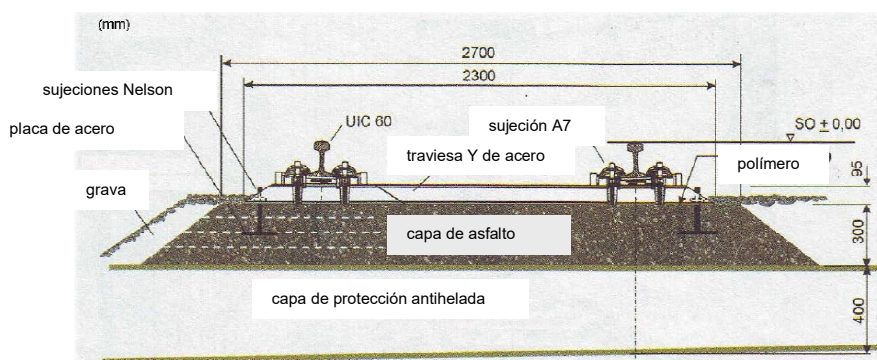


Figura 59: Sección tipo sistema SATO
Fuente: G. Michas (2012)

Cabe destacar que se trata de una solución bastante complicada y costosa que apenas se usó sino que se desarrolló para crear otros sistemas más conocidos como el FFYS que se describe a continuación.

10.2.4.d. FFYS

El principal objetivo del sistema FFYS era mejorar las características del sistema SATO. Es por eso que el FFYS proporciona una mejor estabilidad geométrica de la vía, reduce los costes de implantación gracias a una rápida y fácil ejecución y presenta además una mayor adaptabilidad para la renovación de sus elementos durante el mantenimiento.

El sistema se basa en la disposición de traviesas de acero tipo Y sobre placa de asfalto tal y como muestra el esquema de la Figura 60.

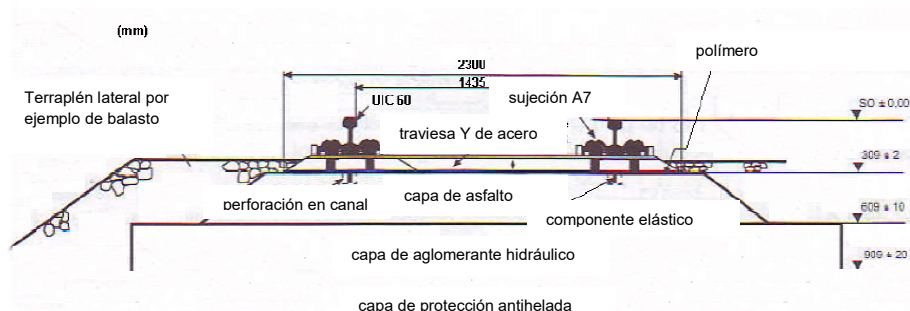


Figura 60: Sección tipo FFYS
Fuente: B. Lichtberger (2005)

La sujeción se realiza en este caso mediante dos barras transversales que se embeben en perforación en la placa principal y que se envuelven además con resina. Las traviesas en Y se realizan mediante dos perfiles metálicos conformados en un desarrollo en S y dos perfiles iguales de desarrollo recto. (Lichtberger, 2005)

Las traviesas en forma de Y ofrecen un doble soporte para el carril y tres áreas de apoyo de los carriles por traviesa. Se muestran los detalles del diseño de este tipo de traviesas en la Figura 61.

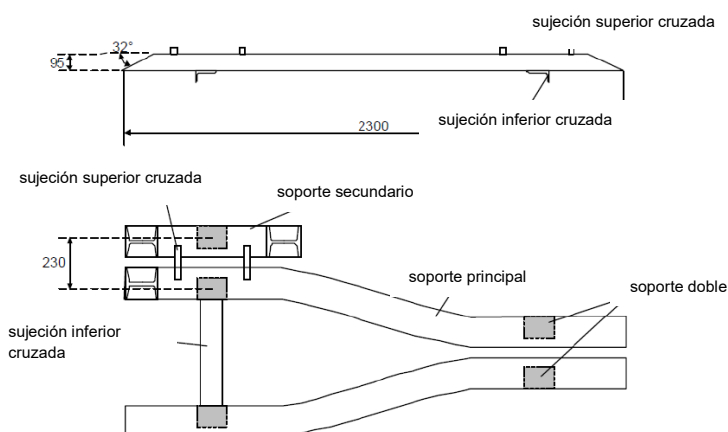


Figura 61: Diseño de las traviesas en Y
Fuente: G. Michas (2012)

La sujeción utilizada en este sistema es la del tipo A7 que pueden corregirse una vez instaladas, tanto en posición vertical como horizontal. Bajo el carril se interpone una almohadilla elástica para absorber las tensiones ejercidas por los vehículos.

Ventajas

- **Limitación de las solicitaciones.** La presencia de asfalto y almohadillas elásticas permiten atenuar los esfuerzos producidos por el paso del ferrocarril.
- **Gran estabilidad.**
- **Aplicabilidad en desvíos.** Su gran estabilidad lateral permite que pueda implantarse en desvíos.

- **Precisión geométrica.** El proceso constructivo y las sujeciones permiten ajustes en planta y alzado.
- **Facilidad de reparación de sus elementos.**

Inconvenientes

- **Posibles dificultades de aislamiento eléctrico.** La traviesa metálica puede provocar problemas debido a las características conductoras del material.
- **Limitaciones por temperatura.** El sistema no resulta apto para temperaturas superiores a los 50°C ya que el asfalto no resulta estable bajo esas condiciones.

10.2.4.e. Getrac

Se trata también de un sistema de traviesas de hormigón pretensado con soporte directo sobre una capa de asfalto. La unión de la traviesa y la capa soporte se realiza mediante una pieza de hormigón o bloque provisto de un anillo de neopreno.

La parte inferior de la traviesa monobloque dispone de un hueco cilíndrico en su parte central en la que encaja el bloque de hormigón mencionado. Estos bloques quedan además confinados a su vez dentro de unos huecos rectangulares practicados en la última capa de aglomerado asfáltico y tienen el objetivo de mantener sujetas las traviesas sobre el asfalto y limitar los esfuerzos longitudinales y transversales. (Rail One, 2012)

Pueden apreciarse los detalles descritos en la sección tipo de la Figura 62.

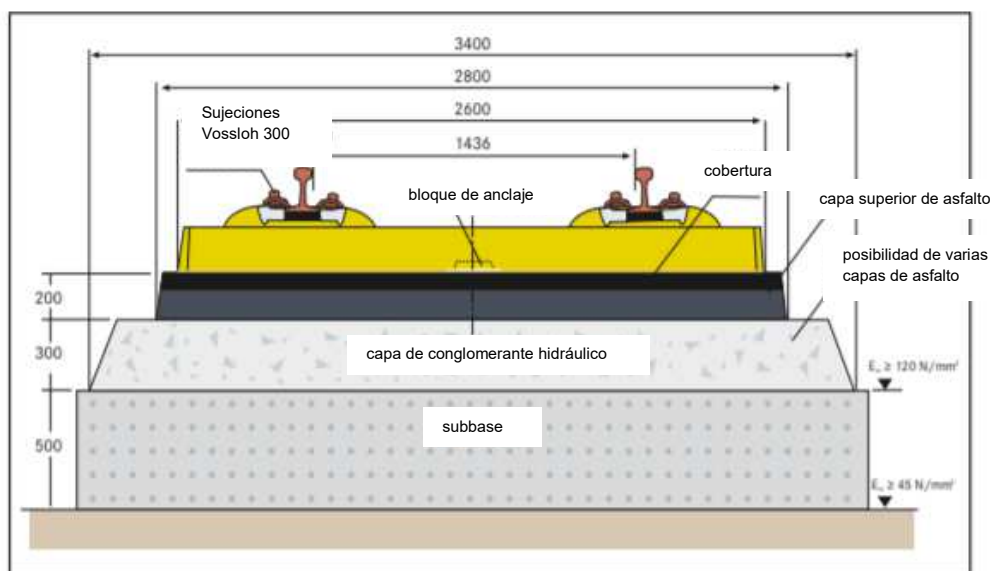


Figura 62: Sección tipo Getrac
Fuente: Rail One (2012)

Cabe destacar que el conjunto queda solidarizado mediante un mortero especial de alta resistencia que se vierte en el hueco rectangular tal y como se puede observar en

la Figura 63. El anillo de neopreno situado entre el taco de hormigón y la traviesa absorben elásticamente los esfuerzos transversales y longitudinales.



Figura 63: Cilindro de anclaje y hueco en la capa de asfalto
Fuente: Rail One (2012)

El proceso constructivo se basa en primeramente instalar una capa portante de aglomerado hidráulico para después ejecutar la capa de asfalto ejecutada al menos en dos fases. En este modelo es posible también eliminar la capa de aglomerado hidráulico y posicionar directamente el asfalto sobre la capa anti heladas.

La instalación de las traviesas individuales de hormigón tiene lugar con las máquinas convencionales de tendido de vías. Un trazador de líneas de la pista realiza el ajuste horizontal de la pista después de la colocación para lograr un posicionamiento óptimo de la vía. Esta se sujeta temporalmente en cada quinta o sexta traviesa para permitir el vertido del mortero en los bloques de anclaje, evitando así cualquier movimiento. El siguiente paso es verter mortero especial sobre los bloques de anclaje y finalmente sujetar los carriles a los soportes de punto y luego soldar. Puede colocarse un geotextil bajo las traviesas para mejorar la transmisión de esfuerzo por fricción a la placa principal de asfalto.

Ventajas

- **Proceso de construcción y maquinaria conocidas.** Es posible ejecutar estos sistemas con la maquinaria usual en obras de carretera y vías con unos rendimientos altos de ejecución ya que se realiza un proceso de preensamblado en fábrica.
- **Aprobación general** otorgada por la Oficina Federal de Ferrocarriles Alemana (EBA).
- **Disponibilidad rápida de la vía.** Después de su instalación o reparaciones es posible el uso de la vía en un corto espacio de tiempo.
- **Gran estabilidad.**
- **Reducida sección de vía.** Permite una altura reducida de vía lo que conlleva una gran flexibilidad de diseño y aplicabilidad en múltiples situaciones.
- **Absorción de vibraciones y ruido.** El asfalto proporciona una mayor capacidad de absorción que el hormigón.

Inconvenientes

- **Limitaciones por temperatura.** El sistema no resulta apto para temperaturas superiores a los 50°C ya que el asfalto no resulta estable bajo esas condiciones.
- **Anclaje delicado.** Se requiere un diseño especial de traviesa con sistema de anclaje adecuado para capa asfáltica.

10.2.4.f. WALTER

El sistema Walter sigue los mismos principios de diseño y producción del sistema BTB. La principal diferencia entre estos dos sistemas es que el sistema Walter usa una capa de soporte de asfalto en lugar de una capa de soporte de hormigón. La traviesa de monobloque está firmemente conectada a la capa de asfalto inferior mediante una varilla de anclaje de acero que cruza la traviesa como se muestra en la Figura 64.

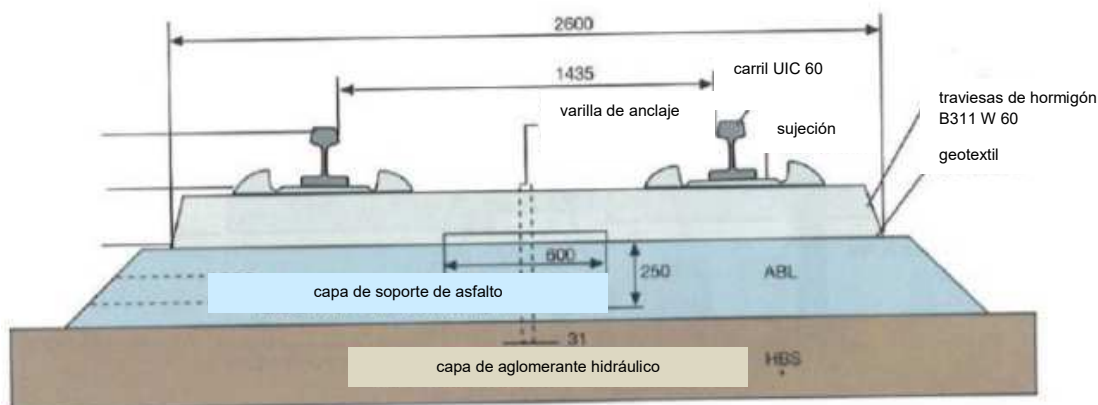


Figura 64: Sección tipo WALTER
Fuente: N. Avramovic (2010)

El sistema Walter presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el sistema BTB debido a las similitudes que presentan en cuanto a sistema constructivo además de aquellas referentes a la introducción del asfalto en la vía.

10.2.5. Sistemas de losas prefabricadas

Este tipo de sistemas se basa en el uso de placas prefabricadas de hormigón armado o pretensado que fijan la inclinación y el ancho de los carriles simultáneamente. Las placas prefabricadas pueden encontrarse en muchos países e incluyen los sistemas de fijación.

La placa principal es la propia placa prefabricada que se apoya sobre la placa base mediante un elemento elástico, normalmente un mortero de asfalto-cemento. En general resulta una estructura con una altura considerable y unos costes mucho mayores que el sistema con balasto.

Se presenta en la Figura 65 un esquema de los sistemas de losas prefabricadas.

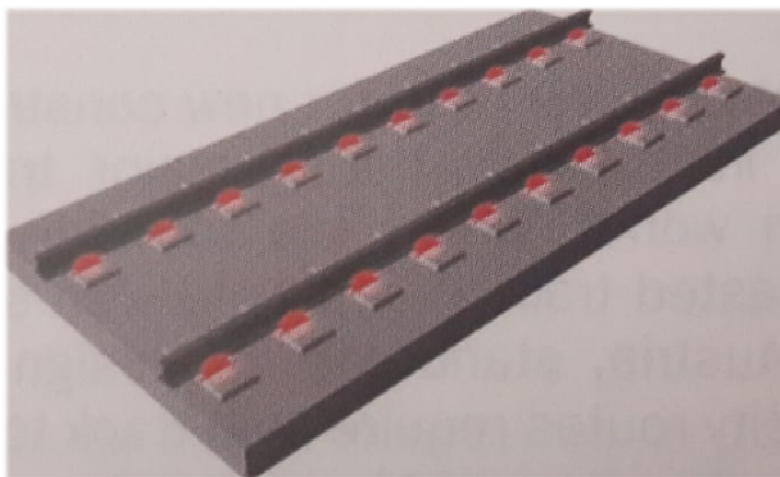


Figura 65: Esquema de sistema de losas prefabricadas
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

10.2.5.a. Shinkansen

Este sistema se desarrolló en Japón durante los años setenta aunque durante este tiempo ha ido implementando mejoras. Consta de una placa base de hormigón y losas pretensadas del mismo material de 4,93x2,34x0,19 m.

Las losas prefabricadas incluyen sujeciones con un solo nivel elástico que se complementan mediante la interposición entre estas y la placa principal de un mortero elástico bituminoso. Las losas se sujetan en sentido longitudinal y lateral por medio de topes cilíndricos de hormigón, rígidamente conectados a la placa base. En la Figura 66 se muestran los elementos y detalles del sistema japonés.

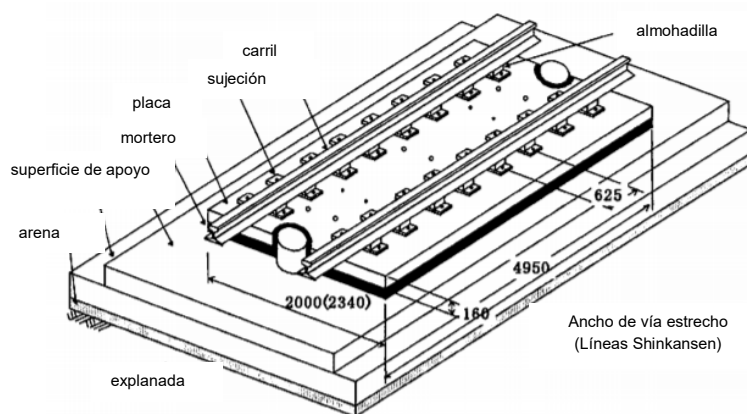


Figura 66: Esquema de la placa Shinkansen
Fuente: D. N. Bilow y G. M. Randich (2000)

Debe prestarse atención al vertido del mortero bituminoso bajo las losas prefabricadas dada su debilidad para satisfacer los requerimientos técnicos. Ha quedado demostrado en experiencias anteriores su comportamiento poco satisfactorio frente a las heladas durante la construcción.

El mortero se vierte en estado líquido una vez las losas se han colocado en su posición final. Su espesor suele ser de 4 cm aunque resulta variable dependiendo

de la elasticidad requerida y la reducción de transmisión de vibraciones sobre todo en entornos urbanos. Puede observarse en la Figura 67 un detalle del cilindro de fijación y el mortero que lo envuelve. (Esveld, 1999)

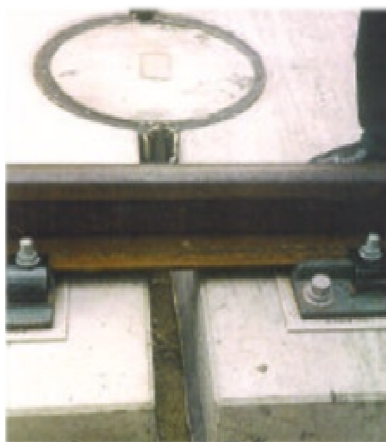


Figura 67: Detalle del cilindro de fijación
Fuente: C. Esveld (1999)

Las placas prefabricadas suelen tener un peso de unas 5 toneladas por lo que con los avances tecnológicos y la mecanización de los procesos constructivos, se ha desarrollado una variante con losas aligeradas. Dichas losas son marcos que presentan un espacio vacío entre los carriles y se unen mediante los mismos cilindros del caso anterior. Las losas presentan 22 cm más de ancho y un espacio central de 286x80 cm que permite reducir el volumen de material y realizar la inyección de mortero bituminoso de forma más eficaz. Se presenta esta variante en la Figura 68.



Figura 68: Sistema Shinkansen con losa aligerada
Fuente: Japan Society of Civil Engineers

El sistema Shinkansen fue uno de los primeros sistemas que se desarrolló y ha servido de inspiración para muchos otros que se han basado en sus mismos principios de construcción.

Ventajas

- **Experiencia dilatada en alta velocidad.** Japón lleva más de 40 años usando este sistema.
- **Altos rendimientos.** Mediante la tecnología actual se pueden conseguir rendimientos de entorno 280 m/día. Es además posible gracias a la sencilla forma en la que se acoplan las estructuras y al hecho que los elementos son prefabricados
- **Rápida apertura al tráfico.** Tan pronto como se acaba la construcción es posible abrir la vía al tránsito.

Inconvenientes

- **Dificultad en la inyección del mortero.**
- **Altos costes de implantación.** Presenta unos costes altos agravados además por las distancias existentes entre las fábricas y el lugar de ubicación.
- **Renovación de placas complicada.** La intervención en las placas prefabricadas implica cortes de vía.

10.2.5.b. Bögl

El sistema Bögl consiste en placas prefabricadas pretensadas con fibras de acero las cuales se unen en dirección longitudinal. La estructura final queda como una estructura monolítica una vez acabado todo el proceso de montaje.

Este sistema resulta muy similar al Shinkansen excepto por el material de las placas prefabricadas y sus medidas, 6,45x2,55 o 2,80x0,20 m.

Las losas están pretensadas en dirección lateral y se aplica el refuerzo tradicional en dirección longitudinal. Los husillos integrados en las losas, mostrados en detalle en la Figura 69, proporcionan un ajuste fácil y rápido de las losas. (Esveld, 2003)



Figura 69: Sección Bögl y detalle de los husillos
Fuente: C. Esveld (2003)

Cada placa dispone de tres puntos de vertido del mortero bituminoso. Se trata de unos orificios en el centro de la placa que permiten introducir el mortero una vez las placas están colocadas en su posición definitiva. Entre la placa principal y la base suelen dejarse entre 3 y 5 cm que se rellenan también del mismo material con el objetivo de proporcionar un apoyo uniforme de la placa prefabricada que compense las irregularidades de ejecución del lecho de cimentación. Se pretende también de esta forma favorecer la distribución de las cargas. En la Figura 70 se muestran dichos elementos así como el resto de constituyentes de este tipo de vía en placa.

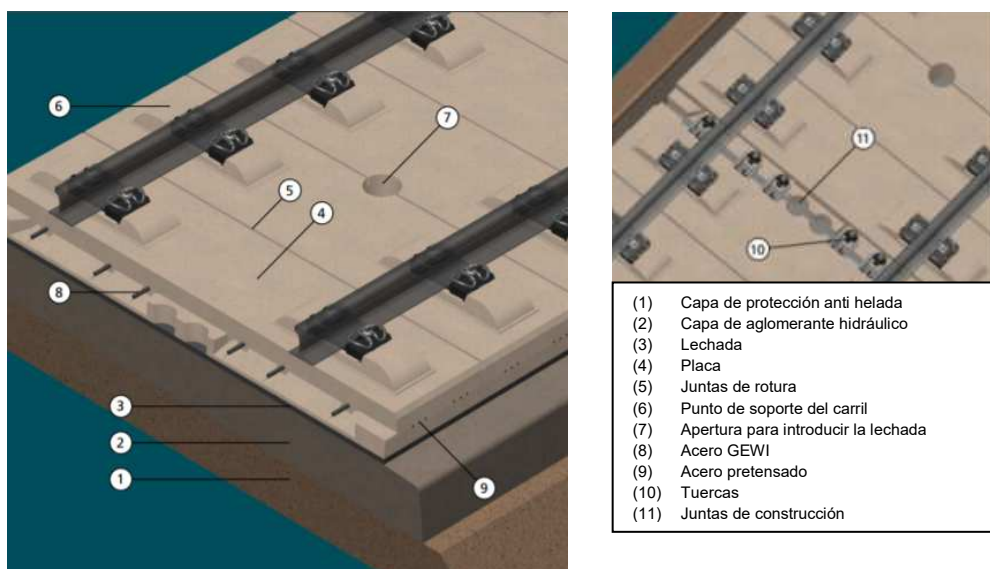


Figura 70: Componentes del sistema Bögl
Fuente: Max Bögl (2014)

Las sujeciones son del tipo Vossloh 300 y disponen de dos niveles de elasticidad. Por lo que a la unión de las losas se refiere, esta se realiza a través del atornillado de dos esperas consecutivas.

El proceso constructivo es del tipo top down como en el sistema Shinkansen. La primera operación consiste en realizar la subestructura. Posteriormente se lleva a cabo la placa base y se posicionan las placas prefabricadas dejando un margen de 5 cm con la placa base mediante separadores diseñados a tal efecto. Finalmente se vierte el mortero asfáltico a través de los orificios y juntas para posteriormente juntar las esperas de anclaje mediante abrazaderas. Los carriles se sueldan in situ una vez finalizado este proceso. La Figura 71 muestra el vertido del mortero asfáltico, la ejecución de la placa y la unión de las esperas entre placas.



Figura 71: Etapas del proceso constructivo del sistema Bögl
Fuente: Max Bögl (2014)

Ventajas

- **Altos rendimientos.** El sistema de unión mecánica entre placas y el uso de elementos prefabricados permite obtener unos rendimientos de ejecución elevados.
- **Rápida apertura al tráfico.** Tan pronto como se acaba la construcción es posible abrir la vía al tránsito.
- **Facilidad de reparación.** Resulta fácil reemplazar elementos dañados o componentes enteros.
- **Amplia experiencia en alta velocidad en Alemania.**
- **Buena precisión geométrica.**
- **Adaptabilidad en distintas situaciones.** Dispone de distintos complementos que permiten implantarlo en desvíos, túneles o permiten la circulación de vehículos de emergencia. (Max Bögl, 2014)

Inconvenientes

- **Alto coste de instalación.** Principalmente debido a los costes derivados del transporte desde la fábrica.
- **Exigencias topográficas elevadas.** Permite muy poca tolerancia por lo que a las correcciones y dimensiones respecta.

10.2.5.c. ÖBB-Porr

Este sistema es originario de Austria y se aplicó por primera vez en 1989. Consiste en placas prefabricadas de hormigón pretensadas que se instalan sobre el apoyo elástico. Estas tienen las siguientes dimensiones: 5,2x2,4x0,16 a 0,24 m tal y como puede verse en la Figura 72.

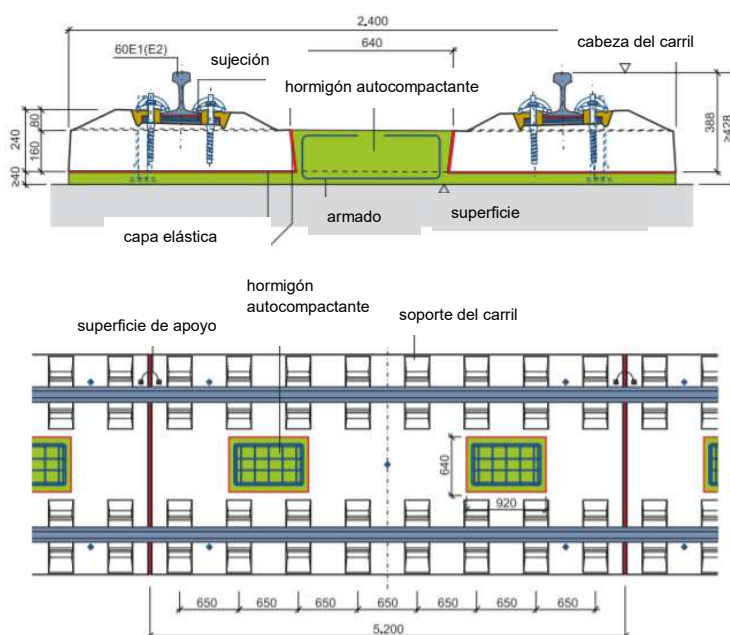


Figura 72: Sección tipo ÖBB-Porr
Fuente: Porr (2012)

Puede verse como las placas presentan un espacio central abierto de 91x 64 cm por el cual se vierte el hormigón que actúa como anclaje de las placas prefabricadas y como elemento de transmisión de esfuerzos longitudinales y transversales.

Así pues se trata de un sistema compuesto por las placas prefabricadas y una losa de hormigón ejecutada in situ. Por lo que a las sujeciones se refiere, suelen utilizarse las Vossloh que tienen dos niveles elásticos.

El contacto entre las placas prefabricadas y la losa de hormigón se recubre con una capa de cemento y poliuretano elástico que mejora la transmisión de vibraciones de las placas y facilita su reemplazo en posibles operaciones de mantenimiento. Esta mezcla se coloca también entre las placas consecutivas las cuales quedan 4 cm separadas. (Porr, 2012)

El proceso constructivo empieza con un replanteo para poder posicionar el drenaje en la base de la vía. Después se transportan las placas prefabricadas y se posicionan con una precisión de ± 1 cm, se posicionan los carriles y se instala el encofrado lateral. Por último, se vierte el hormigón autocompactante y se realizan las últimas fijaciones y correcciones.

Se muestra en la Figura 73 el proceso constructivo mencionado.



Figura 73: Proceso constructivo del sistema ÖBB-Porr
Fuente: Porr (2012)

Ventajas

- **Atenuación de vibraciones y ruido.**
- **Gran aplicabilidad** en túneles, puentes y estructuras de tierra.
- **Facilidad de reparación.** Resulta fácil reemplazar elementos dañados o componentes enteros.
- **Altos rendimientos.** Se obtienen unos rendimientos de ejecución elevados gracias al uso de elementos prefabricados.

Inconvenientes

- **Alto coste de instalación.** Principalmente debido a los costes derivados del transporte desde la fábrica.

10.2.5.d. IPA (Industria Prefabbricati e Affini)

El sistema IPA se desarrolló en Italia y es fundamentalmente la adaptación del sistema de vía en placa japonés Shinkansen a este país europeo. Ambos sistemas resultan tan parecidos ya que es fruto de una cooperación y transferencia tecnológica de los Ferrocarriles Japoneses en vista a la falta de adaptación de su sistema a la explotación ferroviaria italiana.

La principal diferencia reside en el cilindro de anclaje entre las placas que en el caso IPA se forma mediante el rebaje en la placa base y el posterior relleno del espacio con hormigón.

El sistema está formado por placas prefabricadas de hormigón pretensadas longitudinal y transversalmente que se apoyan sobre un lecho de hormigón mediante la interposición de un mortero bituminoso que se inyecta a pie de obra. Este compensa además las irregularidades de la placa base y asegura cierta elasticidad. Se muestran los detalles de esta variante en la Figura 74.

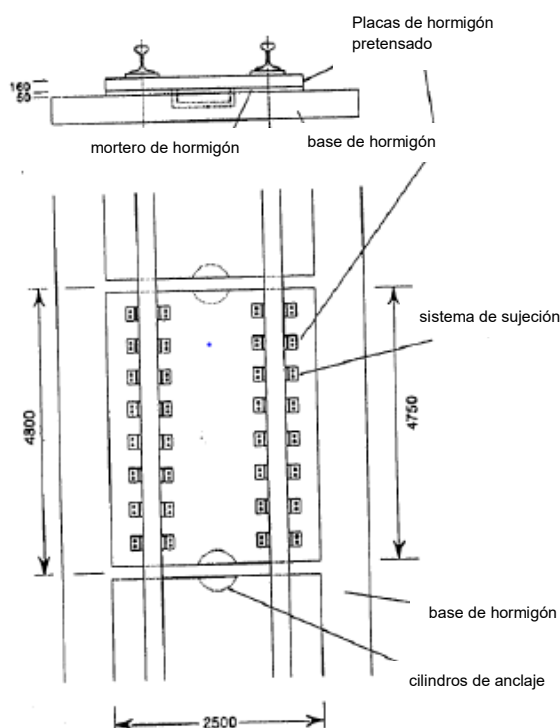


Figura 74: Esquema del sistema IPA
Fuente: D. J. Round (1993)

10.2.6. Sistemas monolíticos

Los sistemas monolíticos son aquellos que están constituidos por una capa de hormigón continua en la que las sujeciones se fijan en la placa principal. Las traviesas se pueden ejecutar mediante una placa continua de hormigón o bien a través de losas prefabricadas conectadas entre ellas.

La fijación directa del carril usada en este tipo de sistemas resulta muy útil en los puentes ya que los hace más ligeros y elimina los problemas asociados con las

traviesas. Se trata de sistemas muy rígidos debido a su concepción y que resultan adecuados para su uso en suelos blandos.

Se muestra en la Figura 75 un esquema de los sistemas monolíticos.

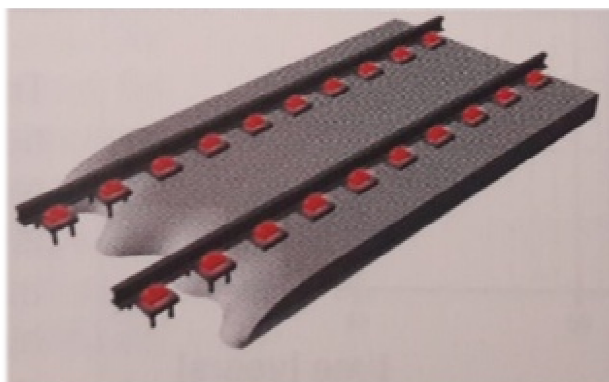


Figura 75: Esquema de sistema monolítico
Fuente: R. Schilder y D. Diederich (2008)

Cabe destacar que su implementación en alta velocidad resulta complicada por esta rigidez mencionada. No obstante, en situaciones como desvíos donde se requiere de una losa rígida fuertemente armada resultan muy útiles.

10.2.6.a. Lawn track o Rasengleis

Se trata de un sistema constituido por una capa de hormigón permeable de normalmente 30 cm que se construye en el subsuelo. Como soporte para los carriles se disponen dos vigas de sección transversal trapezoidal que se conectan en la capa de hormigón que soporta y asegura la estabilidad de las vigas.

Para proporcionar soporte transversal se instala un armado de acero en la losa de hormigón. Por lo que a las sujeciones se refiere, se sujetan a las vigas de hormigón mediante abrazaderas instaladas en espacios previamente perforados. Las sujeciones confieren la posibilidad de corregir la posición. (Michas, 2012)

Por último, el espacio entre las vigas de hormigón y sus áreas exteriores se rellenan con grava y luego con un sustrato cubierto por hierba oligotrófica tal y como puede observarse en la Figura 76.

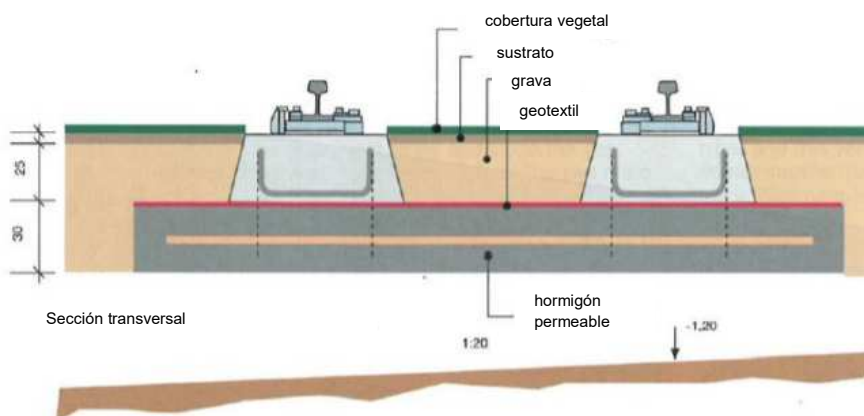


Figura 76: Sección tipo del sistema Rasengleis
Fuente: N. Avramovic (2010)

El sistema Rasengleis tiene más aplicabilidad en sistemas de tranvía urbano que en alta velocidad, por lo que no van a analizarse sus ventajas e inconvenientes.

10.2.6.b. FFC Crailsheim

El FFC Crailsheim nació en Alemania con el objetivo de obtener un sistema de producción económica de vía en placa continua de calidad.

Se trata de uno de los sistemas de apoyo directo del carril sobre la placa principal sin la interposición de traviesas. La fijación de las placas de anclaje se realiza en bloques que posteriormente serán colocados en la losa de hormigón mediante vibración.

Los bloques mencionados son de hormigón y tienen unas esperas de acero con sujeciones y se separan entre sí 65 cm. Los bloques pueden introducirse en el hormigón fresco o pueden colocarse en el hormigón seco mediante taladros y anclajes con resinas.

La placa principal de hormigón tiene 2,40 m de ancho y está armada de modo continuo con una cuantía de acero del 0,9% de la sección transversal de hormigón, lo que permite la libre formación de fisuras. Se encuentra apoyada sobre una placa base que se realiza mediante conglomerante hidráulico y dispone también de una capa anti congelación normalmente de 30 cm.

Se muestran los componentes de dicho sistema en la Figura 77.

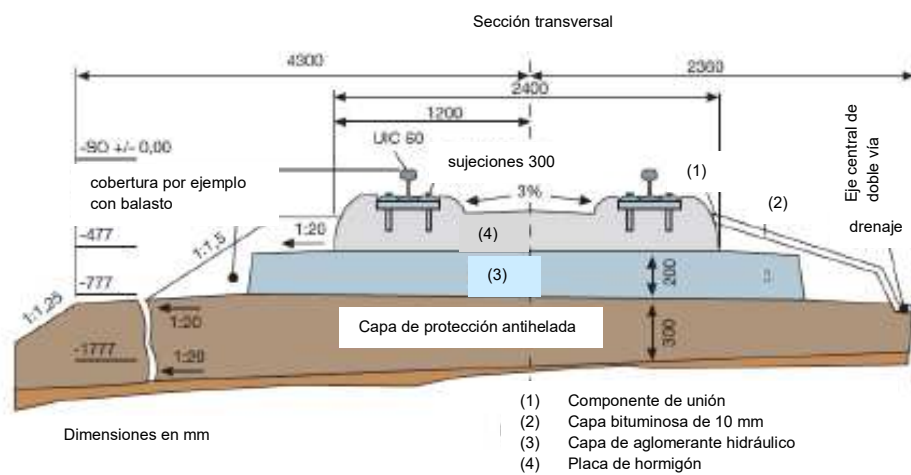


Figura 77: Sección tipo FFC Crailsheim
Fuente: G. Michas (2012)

Las sujeciones utilizadas son las Vossloh 300 con dos niveles elásticos y se colocan sobre los bloques durante la ejecución de estos.

La placa principal se lleva a cabo mediante una extendedora de hormigón y el sistema de sujeción se va ajustando al mismo tiempo. Durante la ejecución debe tenerse en cuenta que cada tres apoyos de carril se realiza una junta transversal de 5 cm de profundidad para evitar la aparición de grietas aleatorias y favorecer el drenaje. (Michas, 2012)

Ventajas

- **Mecanización total del proceso constructivo.** Este hecho permite obtener unos altos rendimientos de producción.
- **Facilidad de alineación y nivelación.** Es posible realizar modificaciones en este campo sin tener que desmontar la vía debido a la presencia de una placa metálica.
- **No requiere maquinaria específica.** Para la ejecución de la placa se requiere una extendidora de hormigón común.

Inconvenientes

- **Alto nivel de vibración y ruido** debido a su gran rigidez.
- **Aparición de fisuras.** La placa principal puede agrietarse debido a variaciones de temperatura, cargas dinámicas o por el asiento irregular de la cimentación de las placas.
- **Aflojamiento de los anclajes del carril.**
- **Ajustes de posición limitados.** Solamente puede ajustarse la posición mediante las sujeciones.
- **Uso poco extendido.**

10.2.6.c. Hochtief/ Shreck-Mieves/Longo

Este sistema se desarrolló por el consorcio de empresas de construcción Hochtief/Shreck-Mieves/Longo, de aquí su nombre.

Tal y como puede verse en la Figura 78 el sistema consiste en una placa de hormigón armado de 20 cm sobre una base de cemento y una capa anti heladas.

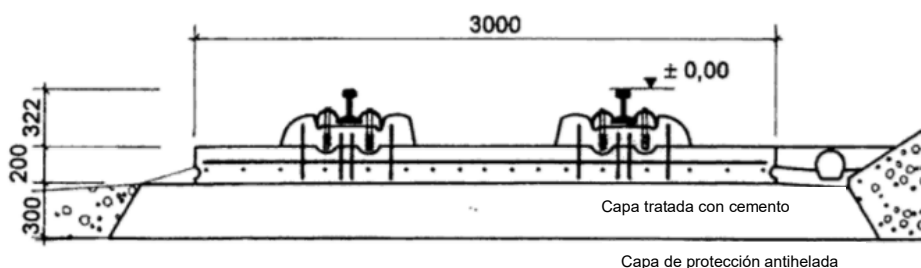


Figura 78: Sección tipo del sistema Hochtief/Shreck-Mieves/Longo
Fuente: H. Falkner (2000)

Se introducen cuatro ancorajes en el hormigón fresco para cada uno de los soportes individuales del carril. Posteriormente, los soportes se ajustan para obtener la altura y nivelación exacta mediante un hormigón reforzado con fibras de acero. (Mörscher, 2015).

Las sujeciones suelen ser las tipo 300. Suele darse una inclinación al sistema para favorecer así el drenaje del agua de lluvia. Cabe destacar que el uso de fibras de acero en el hormigón reveló la aparición de fisuras con grietas casi invisibles. Se

muestra a continuación en la Figura 79 el resultado final de la ejecución de este sistema.



Figura 79: Resultado final del sistema Hochtief/Shreck-Mives/Longo
Fuente: J. Mörscher (2015)

Ventajas

- **Posibilidad de introducción de las fibras de acero para reducir las fisuras.**
- **Facilidad de alineación y nivelación.** Es posible realizar modificaciones en este campo sin tener que desmontar la vía.

Inconvenientes

- **Alto nivel de vibración y ruido** debido a su gran rigidez.
- **Uso poco extendido.**

10.2.6.d. BES

El sistema BES se desarrolló en Alemania y se basa en una placa principal de hormigón armado con puntos de apoyo individuales para el carril. La placa principal está apoyada sobre una placa base de conglomerante hidráulico.

Sigue el mismo proceso constructivo que el anteriormente descrito sistema FFC. Las esperas de los elementos de sujeción se introducen en espacios ejecutados previamente en la placa principal y se fijan con resinas.

La principal diferencia entre ambos sistemas reside en las sujeciones. En el caso del sistema FFC se introduce un componente de hormigón, mientras que en este caso la sujeción se constituye por placas metálicas, almohadillas elásticas, clips y tirafondos de acero.

En la Figura 80 pueden apreciarse los componentes del sistema BES.

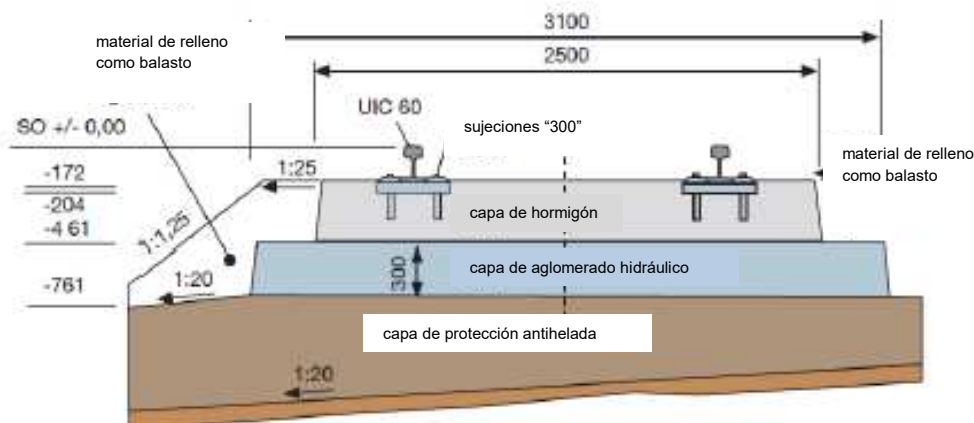


Figura 80: Sección tipo del sistema BES
Fuente: G.Michas (2012)

Debido a sus similitudes presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el sistema FFC.

10.2.6.e. BTE-BWG/HILTI

El sistema BTE se compone de una placa principal de hormigón armado con apoyos individuales para el carril que a su vez se encuentra apoyada sobre una placa base de conglomerante hidráulico tal y como puede observarse en la Figura 81.

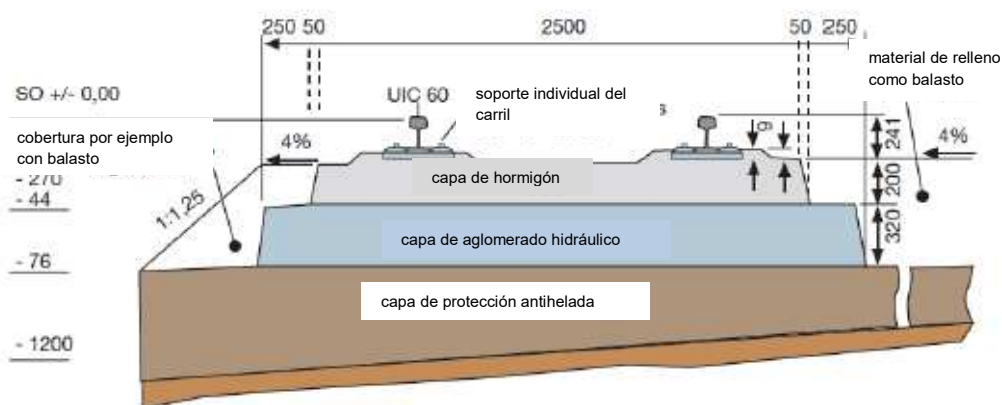


Figura 81: Sección tipo del sistema BTE
Fuente: G. Michas (2012)

Presenta muchas similitudes con el sistema anteriormente descrito BES. De hecho, el sistema de ejecución resulta análogo a los ya mencionados sistemas BES y FFC.

Los apoyos del carril pueden colocarse suspendidos antes del hormigonado de la losa quedando unidos a la misma a través de anclajes o pueden introducirse en el hormigón seco y recubrirse con resinas.

En este caso la sujeción está constituida también por placas metálicas, almohadilla elástica, clips y tirafondos de acero.

Las ventajas e inconvenientes que presenta resultan análogos a los dos sistemas anteriormente descritos.

10.2.6.f. PACT

El sistema PACT (Paved Concret Track) se desarrolló en Gran Bretaña a finales de los años sesenta. Este modelo es la consecuencia del desarrollo y mecanización de los primeros modelos llevados a cabo por los Ferrocarriles Británicos.

El sistema se basa en una losa de hormigón armado continua que se posiciona sobre una capa de hormigón. La conexión entre ambos elementos se obtiene a través del armado de la placa superior que ejerce un esfuerzo al corte. (Dueñas, 2007)

Una vez el hormigón ha curado, el carril continuo soldado se coloca sobre una almohadilla y se fija a la losa. Se puede observar este detalle en la Figura 82.

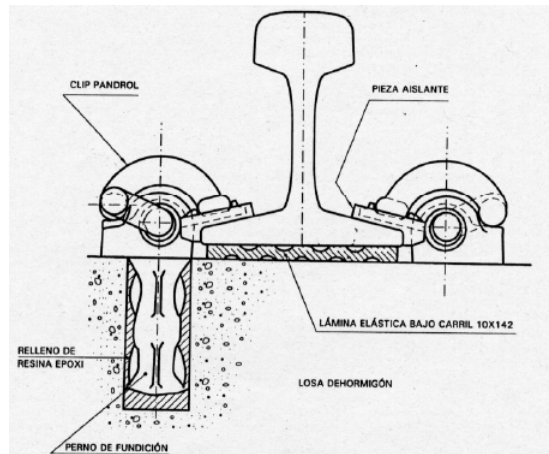


Figura 82: Detalle del anclaje del carril en el sistema PACT
Fuente: R. A. Dueñas (2007)

Se puede ver además como la sujeción cuenta con un perno de fundición que queda anclado a la losa de hormigón mediante el uso de una resina epoxi. Cabe destacar que toda la suspensión elástica la aporta la sujeción. Aunque el sistema fue diseñado desde un inicio para líneas de alta velocidad, se ha utilizado principalmente en túneles debido a su baja altura de construcción y a que no requiere demasiado mantenimiento. Se presentan los detalles del sistema en la Figura 83.

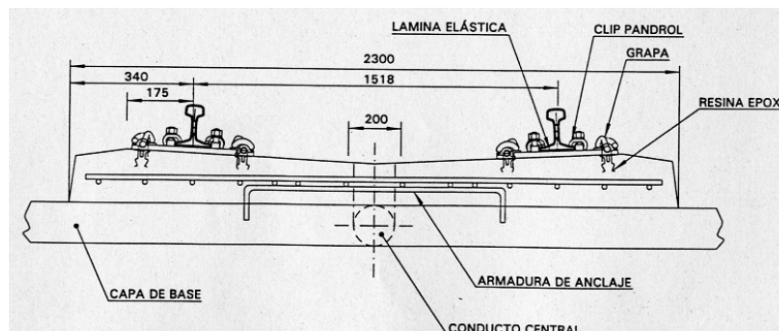


Figura 83: Sección tipo del sistema PACT
Fuente: R. A. Dueñas (2007)

Aunque el sistema PACT tuvo su momento álgido en cuanto al desarrollo de la vía en placa, la falta de construcciones significativas en Gran Bretaña impidió su evolución. De hecho, se encuentra desactualizado para los estándares actuales y las demandas de trenes de alta velocidad.

Ventajas

- **Mecanización del proceso constructivo.** Permite obtener unos altos rendimientos de ejecución.
- **Alta calidad geométrica.**
- **Bajos costes de construcción.**

Inconvenientes

- **Aflojamiento de la sujeción.** No queda garantizado el agarre efectivo del carril
- **Requiere un equipo de instalación especial.** Este hecho resulta limitante además el método de construcción es ya obsoleto (de abajo hacia arriba).
- **Dificultad de reparación.**
- **Gran rigidez.** Incide negativamente en la atenuación del ruido y vibraciones.
- **Aparición de fisuras y grietas.** Se pueden producir holguras que unidas a las vibraciones inducidas por el tráfico, conllevan al aflojamiento de fijaciones y pueden comprometer también la integridad de la placa.

10.3. Experiencia disponible a nivel mundial sobre la utilización de vía en placa

La construcción de nuevas líneas de alta velocidad en Europa a partir de la década de los ochenta hizo replantear la necesidad de aplicar soluciones distintas a la convencional, principalmente por el aumento de tramos de túnel, viaducto y obras de fábrica.

Las nuevas líneas presentaban un mayor número de túneles ya que se pasó de aproximadamente un 6% de la longitud total de las líneas ferroviarias japonesas o suizas hasta un porcentaje de cinco a diez veces mayor. No solo se incrementó la cantidad de túneles sino también su longitud, pasando de ser de 10-20 km a 40-60 km. Estos condicionantes sumados con los parámetros de definición de planta y sección transversal cada vez más restrictivos así como la creciente importancia en aspectos de impacto ambiental, propiciaron la investigación de la superestructura sin balasto por parte de las distintas administraciones ferroviarias.

A partir de aquí los distintos países han ido desarrollando e introduciendo distintos tipos de vía sin balasto. Por este motivo actualmente la vía en placa se percibe como una solución alternativa o complementaria a la vía sobre balasto para ser utilizada en tramos o líneas enteras.

Sin embargo, su extensión presenta grandes diferencias entre los distintos países. De hecho, en Europa existe una situación de bipolaridad en la que las simpatías por el sistema de vía en placa o el tradicional dividen el continente en la zona norte

(Alemania, Holanda) próxima a la vía en placa, frente a la mediterránea (Francia, Italia, España), partidaria del balasto. (Puebla y Fernández, 2000)

A continuación se presenta la evolución, en distintos países, de la vía sin balasto concretando las distintas tipologías aplicadas en las redes de alta velocidad.

10.3.1. Japón

Las primeras experiencias con la vía en placa surgieron en el año 1924 cuando fue tendido un sistema rígido por primera vez en un túnel. Sustituyendo al balasto se colocaron bloques de madera con dimensiones de 600x250x150 mm y se monolitizaron con hormigón hidráulico, formando un basamento bajo cada hilo de carril para evitar problemas con los flujos de agua. Sin embargo, la experiencia de explotación reveló insuficiencias como exfoliación de los bloques respecto la cimentación de hormigón, vibraciones y desplazamientos bajo la carga de trenes. (Estradé J. M., 1991)

Más adelante, en 1964, los Ferrocarriles Japoneses (JNR) pusieron en servicio la línea Tokaido-Shinkansen de alta velocidad a 210 km/h con traviesas de hormigón dispuestas sobre lecho de balasto. Al cabo de 12 años fue necesario cambiar todo el balasto de la línea ya que no presentaba un correcto funcionamiento.

Después de esta primera experiencia, en 1972 se diseñó la vía en placa Shinkansen para la alta velocidad y se introdujo en tramos de la línea Sanyo en el año 1975. Los años siguientes se fueron construyendo las nuevas líneas Tohoku, Joetsu y Hokuriku en las que el porcentaje de vía en placa era cada vez mayor.

Estas líneas transcurrían en gran parte por viaducto o túnel, debido a la orografía y a los parámetros de trazado más restrictivos, como puede observarse en la Figura 84 mostrada a continuación.

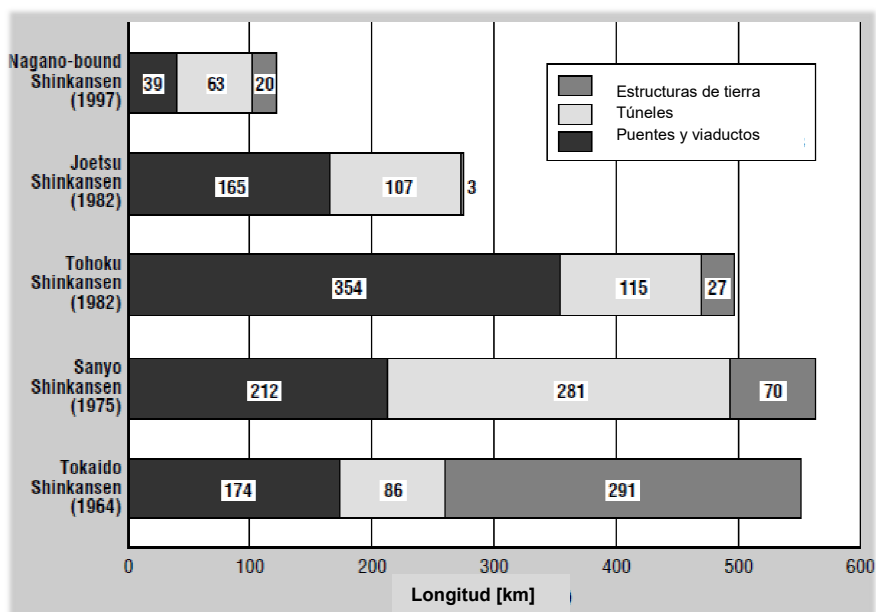


Figura 84: Porcentaje de túneles y viaductos en las líneas japonesas
Fuente: Y. Koyama (1997)

La vía en placa Shinkansen se adaptaba a las características de tráfico así como de velocidades, ofreciendo un buen comportamiento y un reducido mantenimiento.

La aplicación de la solución de la vía en placa se ha ido generalizando hasta tal punto que ha llegado a ser de más del 96% en sus nuevos proyectos de alta velocidad. Actualmente la red de alta velocidad en Japón se compone de unos 3.400 km de los cuales prácticamente el 60% se ha ejecutado sin balasto.

Se muestra en la Figura 85 la red de alta velocidad actual.



Figura 85: Líneas de alta velocidad en Japón
Fuente: Nippon. Información integral sobre Japón

En definitiva, puede decirse que los Ferrocarriles Japoneses fueron los fundadores y pioneros del sistema de vía sin balasto y han acabado exportando su sistema Shinkansen a países como Taiwan donde se han construido 339 km con dicho sistema.

10.3.2. Alemania

Los estudios realizados por la DB AG (la principal empresa ferroviaria alemana) en los últimos años de la década de los sesenta mostraron que la superestructura tradicional en la vía, parejas asentadas sobre balasto, había alcanzado su límite cuando la marcha de los trenes superaba los 160 km/h. Ello dio lugar a un nuevo concepto y modelo de superestructura que designaron con el nombre de "Feste Fahrbahn" (vía en placa). (Escolano, 1998)

A finales de los años sesenta el uso de la vía en placa se restringía tan solo a los túneles. En 1972 la DB AG realizó un tramo de ensayo de 637 m en la estación de Rheda tal y como puede verse en la Figura 86.



Figura 86: Estación de Rheda-Weidenbrück 1972
Fuente: Fiebigs

Este tramo experimental presentó un buen resultado y hasta el momento no ha necesitado de mantenimiento significativo.

En el estudio HSB (vía rápida de alto rendimiento) realizado por la DB en 1971, ya se puso de manifiesto la necesidad de un sistema de vía distinto del tradicional para velocidades superiores a los 200 km/h. Más adelante, a mitad de los años 80, los ferrocarriles alemanes debatieron sobre el diseño de las líneas de alta velocidad entre Hannover-Würzburg y Mannheim-Stuttgart.

En 1991 surgió la alta velocidad en Alemania y se decidió usar el balasto en prácticamente toda la longitud de las líneas mencionadas. Sin embargo, se construyeron dos túneles en vía en placa con una longitud de 9,4 km.

Después de unos años en funcionamiento a 250 km/h, fueron evidentes los problemas en las secciones con balasto que, especialmente en los puentes, fue destruido por abrasión y tuvo que ser reemplazado.

El periodo entre 1991 y 1994 sirvió para ganar experiencia en el uso de este tipo de superestructura ya que se reconstruyeron algunas líneas del este de Alemania.

En 1994 la DB AG adoptó la decisión de partir de la vía sin balasto (FF) como solución inicial en todos los proyectos que hicieran referencia a obras a realizar en líneas de nuevo trazado o en líneas objeto de modernización por las que se preveía circular a más de 200 km/h, salvo que la superestructura tradicional sobre balasto se manifestara como la solución más adecuada por circunstancias o condicionantes locales. Este hecho provocó un aumento en el uso de este sistema.

Puede verse su evolución creciente en la Figura 87.

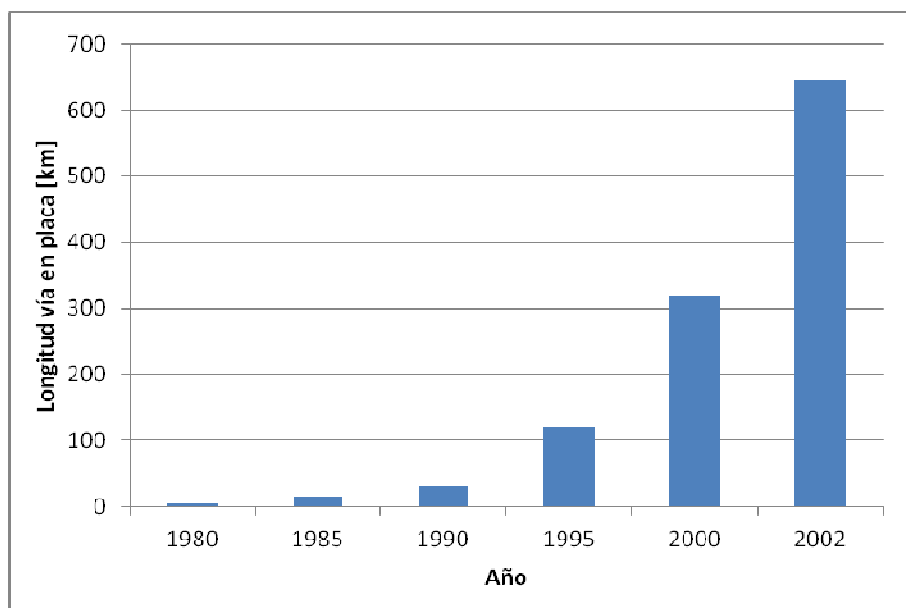


Figura 87: Evolución de la vía en placa en Alemania
Fuente: E. Jaensch, (2003)

De hecho, en 1998 entró en funcionamiento la línea Hanover-Berlín que tiene aproximadamente 90 km construidos en vía en placa. De la misma manera, las líneas posteriormente inauguradas, Frankfurt-Cologne y Nüremberg-Ingolstadt, presentan un elevado porcentaje de tramos con este tipo de superestructura. Puede comprobarse en el gráfico anterior como la construcción de estas líneas tiene lugar en el período de mayor crecimiento y popularidad del sistema de vía en placa.

Se presenta a continuación en la Figura 88 la distribución entre el sistema de vía en placa y tradicional en las líneas antes mencionadas.

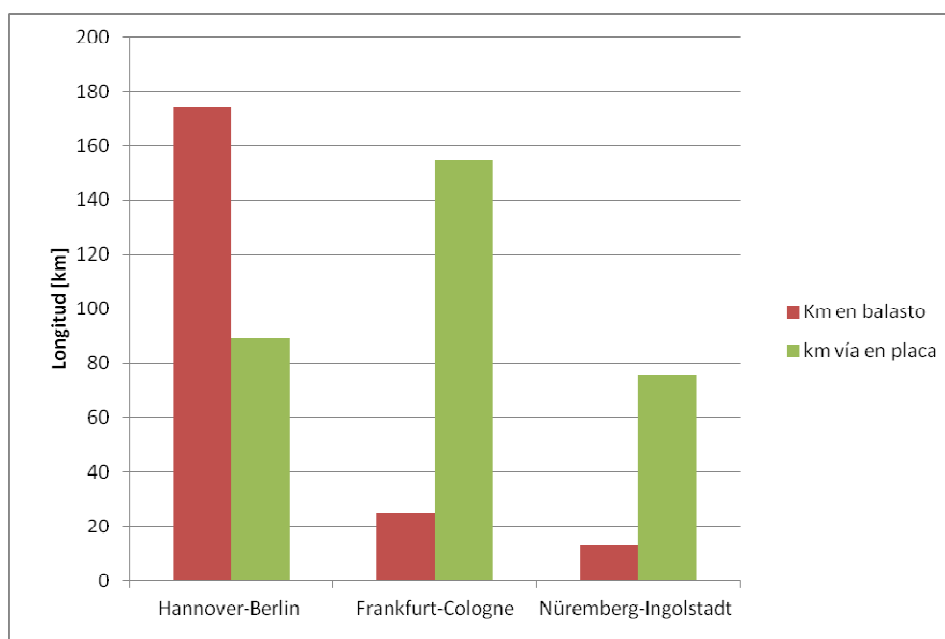


Figura 88: Distribución vía en placa en las líneas alemanas
Fuente: Elaboración propia a partir de E. Jaensch (2003) y P. Münchswander (1999)

Con la apertura de la línea Nüremberg-Ingolstadt en 2006, en Alemania había más de 800 km en vías sin balasto en una red de alta velocidad aproximadamente de 1400 km de longitud, es decir, aproximadamente el 60% de la red alemana se ha construido con superestructura de vía en placa convirtiéndose así en unos de los impulsores de este tipo de tecnología.

Se presenta en la Figura 89 la red actual de ferrocarriles en Alemania.

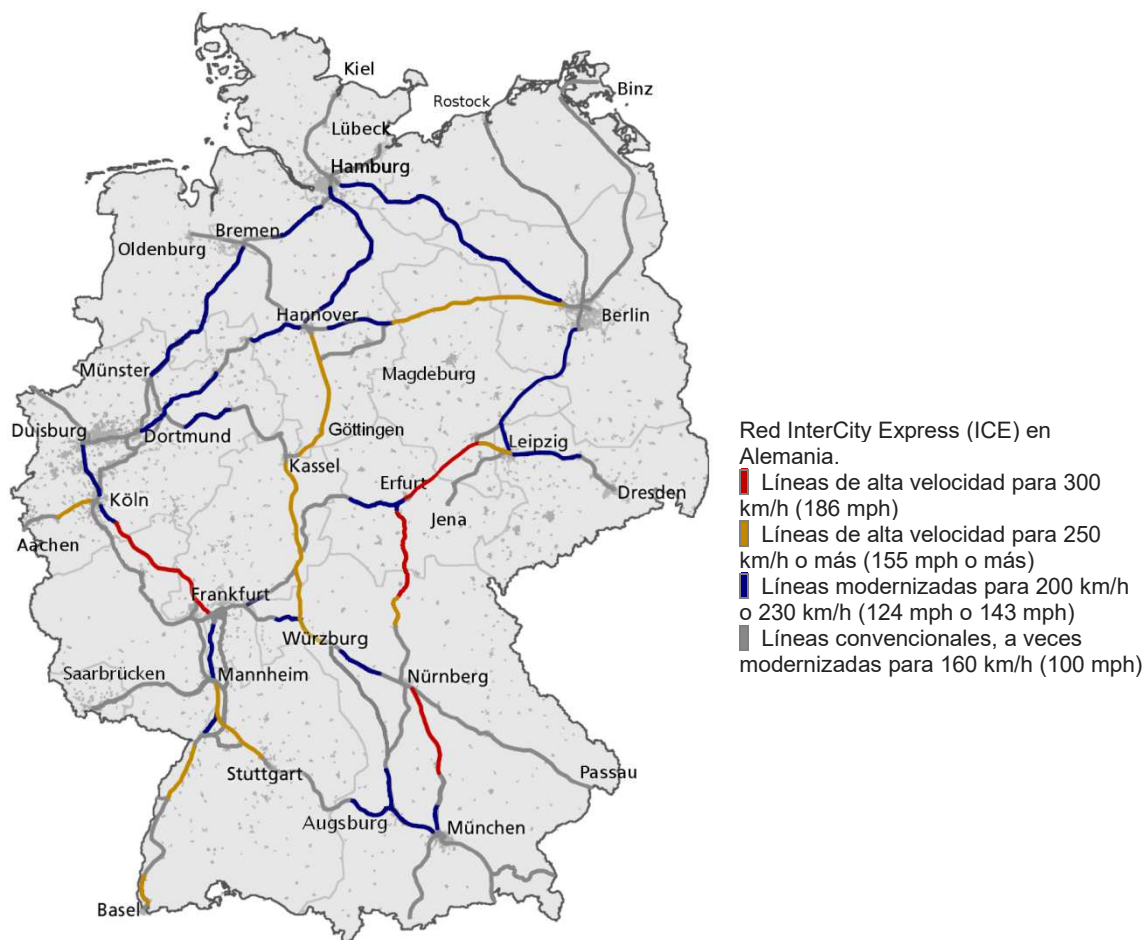


Figura 89: Red de ferrocarriles alemanes
Fuente: ICE

Los sistemas más populares han sido Rheda, Bögl y Züblin, expuestos con anterioridad. Dichos sistemas han presentado un buen comportamiento y han permitido que Alemania se convierta en el mayor desarrollador de sistemas de vía en placa y haya exportado sus modelos a países como España, China o Taiwán.

10.3.3. Taiwan

La alta velocidad en Taiwan llegó en el año 2007 con la línea entre Taipei y Kaohsiung. La línea se empezó a diseñar el año 1999 por consultores europeos para hacer frente a la asfixia que presentaba el sistema de transporte, en particular la carretera.

Inicialmente, la propuesta francesa para la línea se basaba en un diseño en que durante todo el recorrido se utilizaba el balasto, aunque los consultores alemanes más adelante establecieron las secciones que transcurrían en túnel con vía en placa. Después de un exhaustivo análisis económico, la THSRC (Taiwan High Speed Rail Corporation) decidió en 2001 utilizar vía en placa en toda la longitud de la línea, excepto en Tsoying donde se detectó que el terreno se encontraba en malas condiciones.

De hecho, se trata de la línea con la mayor longitud en vía en placa del mundo, con un total de 342 km de doble vía tal y como puede verse en la Figura 90. Así pues, tan solo tres kilómetros están contruidos mediante el uso del balasto.



Figura 90: Recorrido de la línea de alta velocidad en Taiwan
Fuente: Travel China Guide

Se trata de la única línea de alta velocidad del país, con diez estaciones a lo largo de su recorrido y un gran número de puentes, túneles y viaductos. La línea se construyó con el sistema de vía en placa japonés Shinkansen, combinado con el alemán Rheda en las áreas cercanas a las estaciones. Cabe tener en cuenta también la gran afluencia de tráfico que soporta la línea, ya que tan solo un año después de la entrada en explotación el tráfico fue de 80.000 viajeros/día, equivalente a 30 millones de viajeros al año. Se espera que en 2033 pueda transportar 336.000 pasajeros al día.

Taiwan no ha desarrollado ningún sistema propio de vía en placa, de hecho debido a su poca experiencia en el ámbito de la alta velocidad tal y como se ha mencionado, tuvo que contratar a empresas extranjeras para el asesoramiento y construcción de la línea.

10.3.4. China

Actualmente China es el país con más kilómetros de línea de alta velocidad del mundo. Sin embargo, se trata de una red muy nueva ya que su primera línea se construyó en 2007 con motivo de los Juegos Olímpicos de Beijing. A partir de ese momento la red experimentó un rápido crecimiento hasta el punto de construir más kilómetros de alta velocidad que todos los demás países juntos. En la Figura 91 puede observarse la rápida construcción de las líneas de alta velocidad en China.

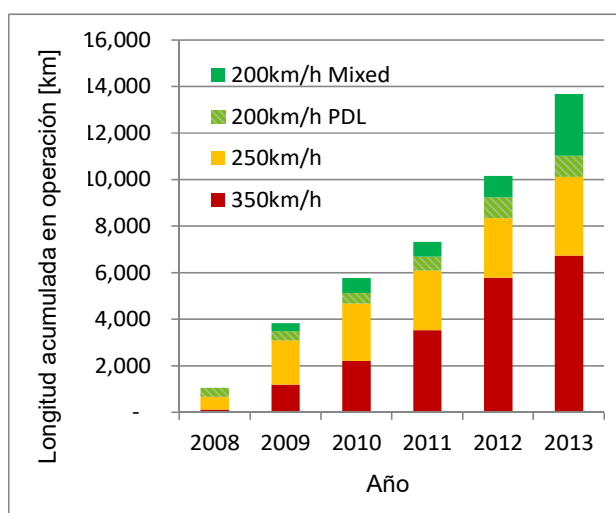


Figura 91: Evolución de la red ferroviaria de alta velocidad en China
Fuente: G. Ollivier, J. Sondhi y N. Zhou (2014)

China carecía de experiencia en este campo y para poder llevar a cabo sus líneas de alta velocidad tuvo que contar con la participación de empresas extranjeras. Se establecieron acuerdos de transferencia tecnológica con empresas principalmente alemanas para en un futuro ser capaces de construir por ellos mismos las nuevas líneas de alta velocidad. En la Tabla 10 se puede observar la participación extranjera.

Línea	Tipo de sistema	País de diseño
Hada PDL	Shinkansen	Japón
Jingin ICL	Bögl	Alemania
Wuguang PDL	Rheda 2000	Alemania
Zhengxi PDL	Züblin	Alemania

Tabla 10: Tecnologías procedentes de otros países aplicadas en China
Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

La primera línea en inaugurarse fue la que unía las ciudades de Pekín y Tianjin con una velocidad de 350 km/h. La línea discurre en su longitud total, 117 km, por vía en placa y fue realizada por el grupo alemán Max Bögl que se ocupó de realizar la superestructura. (Ollivier, Sondhi y Zhou, 2014)

Cabe destacar que la red china se compone de líneas PDL (Passenger-dedicated lines) en las cuales la vía en placa es el sistema mayoritario, y de líneas ICL (Intercity lines). Estas últimas alcanzan velocidades menores (200-250 km/h) y se ha usado balasto en aquellos tramos donde se disponía de este recurso con garantías.

La gran mayoría de las líneas están construidas sin balasto y cubren las áreas de China que presentan grandes diferencias climáticas, así como aquellas con unas condiciones geológicas complejas. En China se ha usado este tipo de superestructura tanto en tierra como en viaductos y túneles. Sus proyectos más destacados pueden verse en la Tabla 11.

Línea	Longitud sin balasto [km]
Beijing-Tianjin	120
Wuhan-Guangzhou	1069
Zhengzhou-Xi'an	505
Shanghai-Nanjing	300
Shanghai-Hangzhou	169
Haerbin-Dalian	904
Lanzhiu-Urumchi	1775

Tabla 11: Principales líneas de alta velocidad sin balasto en China
Fuente: J. Wang (2011)

Gracias al conocimiento transferido por parte de otros países, China ha desarrollado dos tipos de sistema de vía sin balasto, el CRTS I y el CRTS II los cuales se basan en las características de modelos alemanes y japoneses.

Aunque estos sistemas no se han exportado aún a otros países, China se ha posicionado como el país con mayor longitud de vía en placa del mundo. Se muestra a continuación en la Figura 92 la red de ferrocarriles de este país.



Figura 92: Red de alta velocidad en China
Fuente: Johomaps

10.3.5. Corea del Sur

La primera línea de alta velocidad en Corea del Sur fue la que unía las ciudades de Seoul y Busan. La nueva línea entró en servicio comercial en dos fases, la primera, de Seoul hasta Daegu (330 km), en el año 2004, y la segunda, Daegu-Busan (82 km), en 2010.

Los motivos que llevaron a construir esta línea fueron la saturación del corredor y la ineficiencia de los modos de transporte para hacer frente a las necesidades de demanda. Debe tenerse en cuenta que Corea del Sur contaba con una población de 43 millones de habitantes y que aproximadamente el 70% de ellos se distribuía a lo largo de la diagonal Seoul-Pusan.

Durante la construcción de la primera fase se realizaron algunas de las secciones con sistemas de vía en placa a modo de prueba, aunque en la mayoría de la longitud se utilizó el balasto basándose en las ya existentes líneas de alta velocidad francesas.

Sin embargo, después de que la línea entrara en servicio se dieron cuenta de las desventajas que presentaba el balasto ya que debido a la gran afluencia de tráfico, se preveía que el tiempo destinado al mantenimiento se reducía a poco más de una hora y media por las noches. Este tiempo resultaba insuficiente para una línea diseñada para circular a 350 km/h donde el balasto sufre un gran deterioro. (Aranda, 2006)

Es por eso que se decidió realizar la segunda fase en su totalidad con el sistema de vía en placa alemán Rheda 2000.

La siguiente línea que se construyó pasaba por el sur oeste del país hacia Mokpo y se construyó también enteramente en vía en placa. En la Figura 93 puede observarse la red actual de alta velocidad en Corea del Sur.

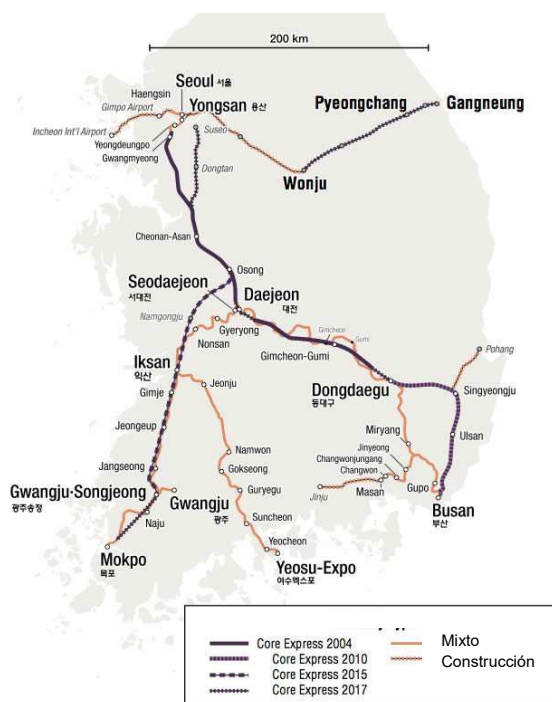


Figura 93: Red de alta velocidad en Corea del Sur
Fuente: Midwest High Speed Rail Association

10.3.6. Italia

Italia fue el primer país europeo en iniciar estudios en el campo de la alta velocidad. La administración ferroviaria italiana se vio obligada a definir las características técnicas con las que proyectar y explotar una nueva conexión para enlazar Roma con Florencia debido al elevado número de circulaciones que se producían y por las dificultades de explotación que limitaban su velocidad a 90-105 km/h.

Durante la segunda mitad de los años sesenta los ferrocarriles italianos (Ferrovie dello Stato) iniciaron los primeros estudios respecto a la construcción de una red de alta velocidad. En 1968 se concibió el proyecto de construcción de cuatro variantes, que sumaban un total de 120 km, y la renovación del resto de la línea de Roma-Florencia conocida como la Diritissima. Los FS decidieron construir esta nueva línea de alta velocidad para tráfico mixto de trenes de viajeros y de mercancías. El primer tramo se inauguró en 1978 pero la línea no se terminó del todo hasta 1992 debido principalmente a problemas de financiación, lo que hizo que Italia se quedara muy por detrás de otros países como Francia o Alemania en lo que alta velocidad ferroviaria se refiere. (Pita, 2014)

En el año 1992, la FS tenía menos de 100 km de vía sin balasto, de los cuales 25,4 km de encontraban en la línea Roma- Florencia. El sistema que implantaron fue el IPA, desarrollado por ellos mismos basándose en el concepto japonés.

Sin embargo, el uso de la vía en placa no se encuentra casi en ninguna de sus líneas ya que su uso no se extendió como en otros países. De hecho, la típica sección de vía de las principales líneas de alta velocidad italiana es en balasto con la peculiaridad de que introduce una capa de subbalasto bituminoso de unos 12 cm tal y como se muestra en la Figura 94.

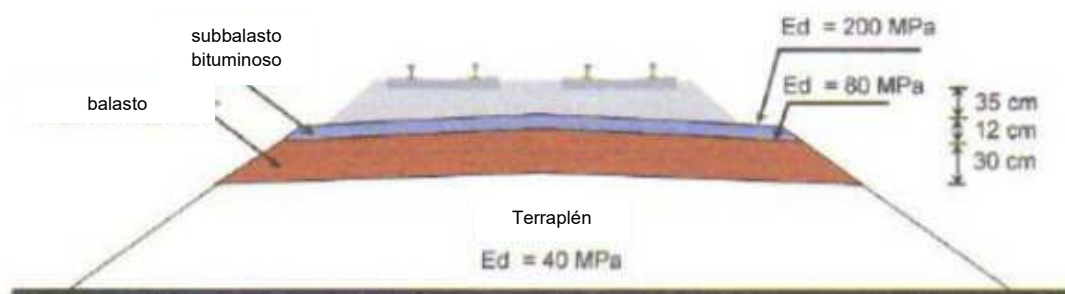


Figura 94: Diseño de la típica sección de los ferrocarriles italianos
Fuente: J.G. Rose (2013)

Esta disposición se puede encontrar en las líneas Milán-Venecia, Milán-Génova o Turín-Milán. La Figura 95 muestra la actual red de alta velocidad italiana donde puede apreciarse como la red se articula en dos grandes ejes que simulan la forma de una gran T: Milán-Bolonia-Florencia-Roma-Nápoles con dirección Norte-Sur y Turín-Milán-Verona-Venecia, orientada en dirección Este-Oeste.



Figura 95: Red de alta velocidad en Italia
Fuente: Ferrovie dello Stato Italiane

10.3.7. Bélgica

En diciembre de 1997 entró en servicio la nueva línea de alta velocidad desde la frontera francesa a Bruselas, conectando con el TGV Norte. Desde un inicio, la red belga fue concebida con el objetivo de no solo servir a Bruselas sino conectar Bélgica con los países vecinos, Holanda y Alemania, tal y como se observa en la Figura 96. De hecho, se encuentra en el centro de la futura red PBKA: París-Bruselas-Colonia-Ámsterdam.

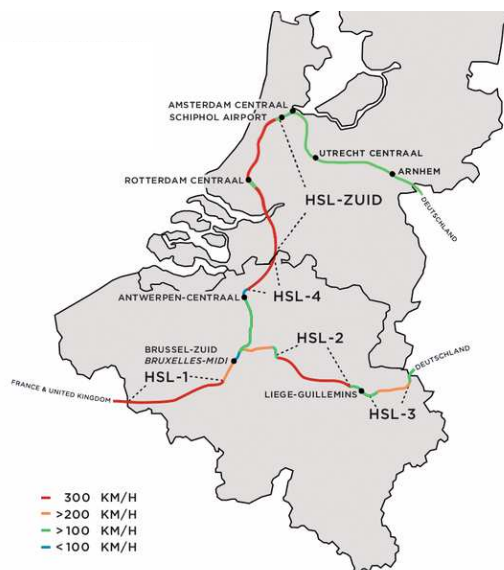


Figura 96: Red de alta velocidad en Bélgica
Fuente: Ferropedia

La vía en placa se encuentra presente sobretodo en los túneles y puentes de las diferentes líneas belgas como por ejemplo la línea que une Antwepern con el aeropuerto de Schipol en la que se ha implantado el sistema Rheda.

Sin embargo, las primeras experiencias sin balasto se llevaron a cabo ya a inicios de los años setenta. Básicamente se aplicaron en dos tipos de situaciones: en túneles antiguos que tenían que ser electrificados y el gálibo libre no podía aumentarse sin rebajar la posición de la vía y en puentes con tablero móvil.

11. Selección de la tipología de vía en placa para el caso español

En este apartado se pretende determinar el sistema de vía en placa que resultaría más adecuado para su aplicación en la línea de alta velocidad del País Vasco teniendo como referencia los hasta ahora expuestos.

A grandes rasgos, el primer aspecto a tener en cuenta hace referencia a las características técnicas de los sistemas y la disponibilidad de recursos para su implantación en la zona objeto de estudio. Será necesario también realizar un estudio económico para determinar la viabilidad de la propuesta realizada. No obstante, este último aspecto se abordará en el siguiente apartado, una vez seleccionado el sistema teniendo en cuenta los aspectos técnicos.

Así pues, primeramente se establecen algunos criterios que permitan comparar las distintas tipologías de vía en placa expuestas. Estos criterios se determinan teniendo en cuenta las ventajas mencionadas en anteriores apartados así como las características o situaciones que hacen propicia la utilización de la vía en placa.

Los criterios escogidos son:

- Facilidad de construcción y reparación.
- Comportamiento ante ruido y vibraciones.
- Rigidez de la vía.
- Aplicación en situaciones especiales como túneles, puentes o desvíos.
- Homologación en alta velocidad.
- Experiencia.

Se valoran a continuación dichos aspectos para las tipologías de vía en placa explicadas en el apartado 10.2.

- **Facilidad de construcción y reparación**

Para evaluar la facilidad de construcción se comparan los rendimientos que se obtienen en obra.

Los rendimientos de construcción de la vía en placa dependen del número de elementos in situ o prefabricados necesarios en cada tipología. Normalmente existe un elemento crítico que determina el rendimiento del conjunto. Por ejemplo en la línea holandesa HSL Zuid los rendimientos de construcción de la capa base fueron de 600 m/día, en cambio el posicionamiento de la estructura de la vía presentaba rendimientos de hasta la mitad.

La fabricación de elementos prefabricados también puede limitar el rendimiento de la construcción pero es evitable si es posible un almacenamiento intermedio de las losas o los elementos prefabricados. A continuación en la Figura 97 se muestran los rendimientos de los principales sistemas de vía en placa.

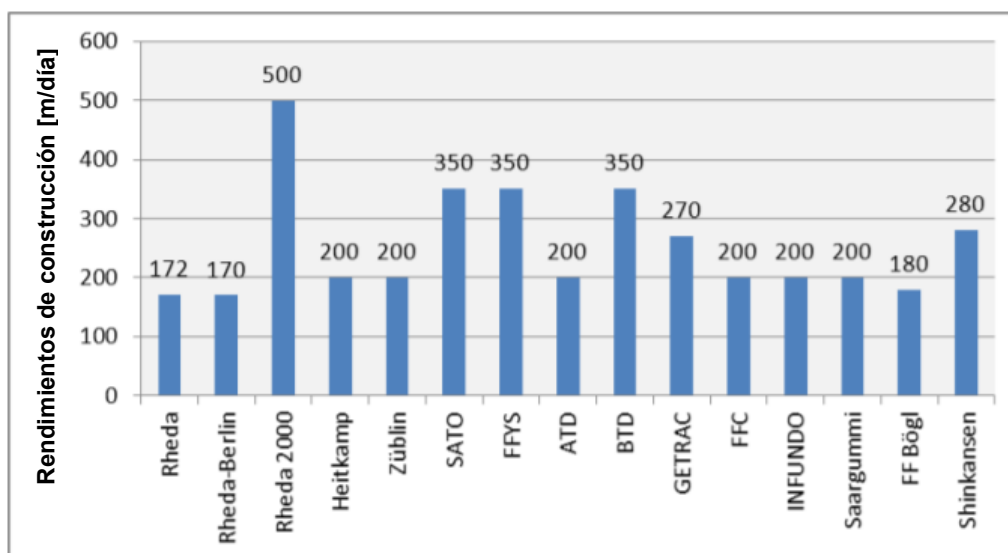


Figura 97: Rendimientos de construcción de los distintos sistemas de la vía en placa
Fuente: UIC (2014)

Puede verse como los sistemas que presentan un proceso constructivo más efectivo tienen rendimientos superiores a 300 m/día. Destaca de manera especial el sistema Rheda 2000 con un rendimiento de 500 m/día debido a la gran mecanización del sistema constructivo y a los años de experiencia en investigación e introducción de mejoras.

Pero en general los mayores rendimientos se obtienen por parte de los sistemas en los que se introduce asfalto ya que no requieren endurecimiento y pueden someterse a carga inmediatamente después de que el material se enfríe.

Por lo que a la reparación se refiere, los trabajos en la vía en placa resultan complicados, caros e implican tiempo. El curado y endurecimiento del hormigón requieren un largo periodo de tiempo por lo que las reparaciones después de un accidente pueden conllevar el cierre de la línea durante un tiempo considerable.

Algunos tipos de sujeciones permiten solucionar defectos debidos a pequeños asientos, por ejemplo el Vossloh FS300 permite ajustar la posición vertical 76 mm introduciendo placas de acero. De esta forma, se evitan intervenciones en la placa.

En el caso de los sistemas de losas prefabricadas es posible cambiar la placa entera. Este hecho deja entrever la importancia de la modularidad en caso de tener que llevar a cabo grandes intervenciones de mantenimiento.

La modularidad es el grado por el cual los componentes de un sistema pueden separarse y recombinarse. Además, la modularidad ofrece beneficios durante la explotación de la vía ya que permite por ejemplo adaptarse a cambios sobre la demanda de tráfico con tan solo introducir nuevos elementos mejorados.

Los sistemas prefabricados como el Bögl, ÖBB Porr o Shinkansen disponen de gran modularidad y permiten reparar la vía fácilmente cambiando los elementos dañados de forma individual.

• Comportamiento ante ruido y vibraciones

Como ya se ha mencionado, el hecho de eliminar el lecho de balasto conlleva un aumento del ruido en unos 5 dB. Es por eso que en muchos sistemas se introducen materiales elásticos con el objetivo de atenuar ruido y también vibraciones.

El ruido en el funcionamiento de los ferrocarriles surge principalmente del área de contacto rueda/carril. En particular, hay dos fuentes diferentes:

- Ruido en el aire debido al motor, el balanceo, las curvas, el frenado y el ruido aerodinámico.
- Vibración y, como consecuencia, ruido estructural.

En general, los sistemas de carril embebido presentan una notable reducción del ruido y vibraciones gracias a la introducción de elastómeros como el Corkelast en el caso del sistema Edilon. (D2S International, s.f.)

El comportamiento por lo que al ruido y vibraciones se refiere está estrechamente ligado a la presencia de los elementos elásticos. Así pues, su atenuación incrementará con el número de niveles elásticos presentes en el sistema.

Los sistemas con más de dos niveles elásticos o aquellos como el Sonnevile LVT, diseñados especialmente con el objetivo de reducir los niveles sonoros y vibraciones, son los que presentan un mejor comportamiento.

Este hecho se puede observar en la Figura 98 donde se aprecia que el carril embebido y los sistemas LVT presentan un mejor comportamiento por lo que a las vibraciones se refiere.

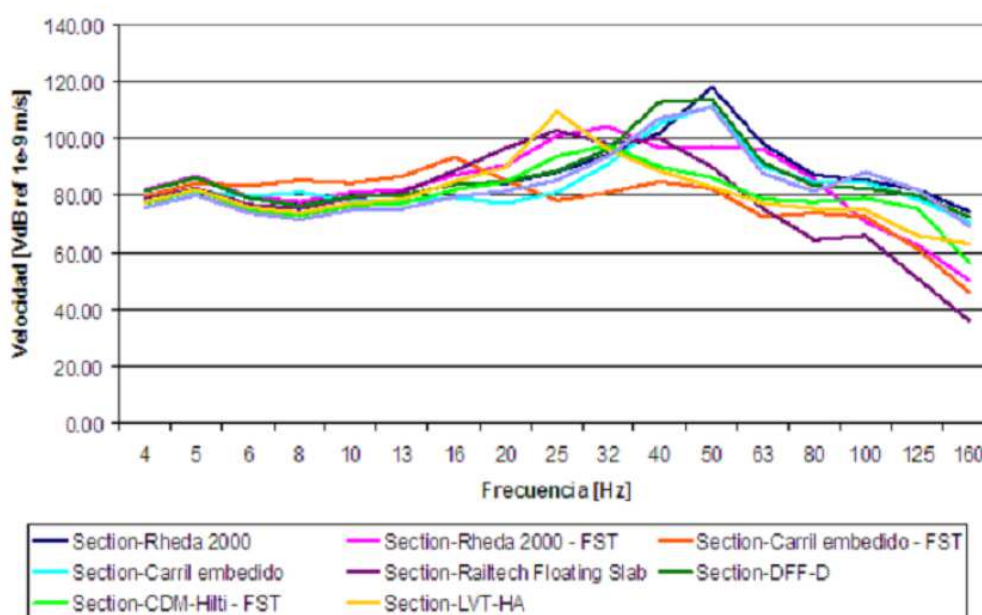


Figura 98: Comparación de las vibraciones producidas por distintos sistemas en un túnel
Fuente: D2S International (s.f.)

Cabe destacar que los sistemas que contienen asfalto presentan también un comportamiento satisfactorio gracias a sus propiedades absorbentes. En cambio, los sistemas monolíticos son difíciles de implementar en alta velocidad ya que las vibraciones y ruido resultan demasiado elevados debido a su rigidez.

- **Rigidez de la vía**

Se ha demostrado ya la influencia que tiene la rigidez de la vía en su deterioro mediante la ecuación de Prud'Homme. Una mayor rigidez implica un incremento de las sollicitaciones verticales y por lo tanto, deben llevarse a cabo más acciones de mantenimiento debido al mayor desgaste.

Debe mencionarse que la rigidez no depende solamente del sistema sino del tipo de terreno sobre el cual se encuentra. De hecho, el tipo de terreno puede condicionar la elección del sistema, ya que por ejemplo si se trata de un suelo blando probablemente será necesario usar un sistema con una gran rigidez para aportar resistencia al conjunto.

A continuación en la Tabla 12 se muestra la rigidez a flexión que presentan los diferentes sistemas de vía en placa.

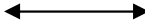
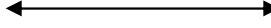
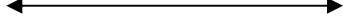
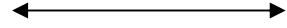
Tipología de vía en placa	Rigidez a flexión	
	Baja	Alta
Traviesas o bloques embebidos en hormigón		
Traviesas sobre lecho de asfalto u hormigón		
Losas prefabricadas de hormigón		
Sistemas monolíticos		
Carril embebido		
Carril enchaquetado		

Tabla 12: Rigidez a flexión de los sistemas de vía en placa
Fuente: C. Esveld (2001)

- **Aplicación en situaciones especiales como túneles, puentes, estaciones o desvíos**

Se ha mencionado ya la gran aplicabilidad de la vía en placa en puentes, entornos urbanos y túneles. En los túneles la principal ventaja es la reducción de altura de la superestructura que permite disminuir la sección a excavar y en consecuencia sus costes. A continuación, en la Figura 99 se muestra una comparativa de las alturas de la superestructura de distintos sistemas de vía en placa.

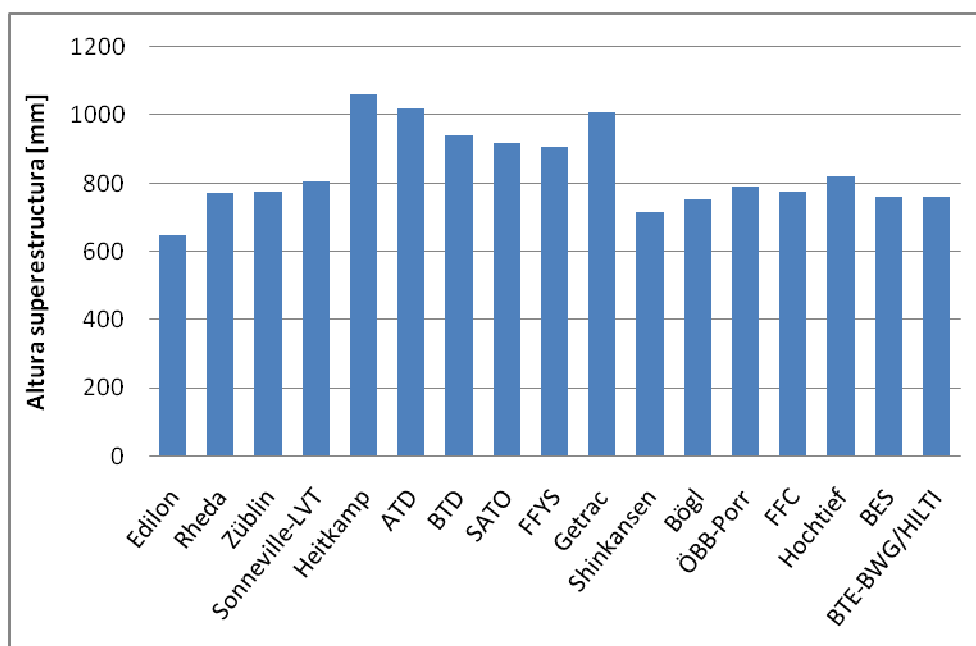


Figura 99: Altura de la superestructura de diferentes sistemas de vía en placa
Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

Puede verse como el sistema Edilon presenta el menor valor debido a que el carril se encuentra en unas entalladuras dentro de la placa y requiere tan solo 650 mm de altura. Los sistemas de losas prefabricadas como el Shinkansen, Bögl y ÖBB-Porr presentan también valores reducidos, entre 715-792 mm. De la misma manera los sistemas de traviesas o bloques hormigonados Rheda o Züblin presentan una altura entorno a los 775 mm. Por último se encuentran los sistemas de traviesas sobre losa de hormigón o asfalto que presentan los valores más altos llegando a superar los 1.000 mm.

Por lo que a los puentes se refiere, la ventaja principal que la vía en placa presenta es la reducción del peso de las estructuras. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el procedimiento constructivo de estas infraestructuras. Como se ha mencionado en apartados anteriores, los puentes de gran longitud requieren una ejecución con losas independientes y es por eso que los sistemas de losas prefabricadas resultan más fáciles de implementar en estas situaciones. De implantar otro tipo de sistema deberían aplicarse coeficientes reductores al rendimiento de ejecución ya que sería necesario adaptar el proceso constructivo. De la misma manera, los costes se verían incrementados.

Otra de las aplicaciones de la vía en placa es en estaciones y entornos urbanos. Los sistemas que tienen mejor aplicabilidad son aquellos que presentan atenuación de ruido y vibraciones. Resulta un aspecto muy importante debido a que las estaciones están normalmente cerca de entornos poblados y por lo tanto resultan espacios sensibles a emisiones sonoras y vibraciones.

Los sistemas de carril embebido como el Edilon son una de las mejores opciones, de hecho, en España muchas de las estaciones de alta velocidad tienen este sistema implantado. El sistema Edilon ofrece además una superficie de apoyo apta para la circulación del tránsito rodado, muy útil en el caso de evacuación o emergencia. No

obstante, pueden aplicarse otros sistemas que garanticen los niveles de ruido y vibraciones establecidos así como las condiciones de accesibilidad ya que algunos sistemas como el Rheda 2000, Getrac, Sonneville LVT o Bögl disponen de sistemas adicionales para garantizar tal aspecto.

Por último, un aspecto crítico en toda línea son los aparatos de vía como los desvíos. Son muchos los sistemas que disponen de elementos propios para realizar los desvíos como por ejemplo el Rheda, Shinkansen o Bögl entre otros. Sin embargo, hay sistemas que a pesar de disponer tecnología para desvíos, resultan de difícil implantación como por ejemplo los bloques Edilon o Sonneville LVT.

Se ha de destacar que en el caso de sistemas con apoyo continuo del carril no es posible realizar los desvíos y es necesario implantar otros sistemas para ejecutar estas secciones. También en este caso se encuentran los sistemas de traviesas sobre losa de hormigón o asfalto ya que debido a la menor resistencia lateral no disponen de dicha tecnología.

- **Homologación en alta velocidad**

La entrada en servicio comercial de una nueva línea va precedida de una serie de ensayos destinados a confirmar que se dan las circunstancias en la línea y en el material que garantizan la circulación segura de las composiciones ferroviarias a las velocidades programadas. Este proceso se conoce como homologación.

En este caso, a la hora de elegir un sistema de vía en placa es fundamental que esté ya homologado para velocidades superiores a 300 km/h.

A través de la información disponible en los catálogos técnicos de los distintos sistemas y también en los informes de algunas administraciones ferroviarias, se constata que los siguientes sistemas disponen de homologación en alta velocidad: Edilon, Rheda 2000, Züblin, Bögl, OBB Porr, Stedef, Sonneville LVT, Getrac, ATD, BTB, IPA y Shinkansen.

- **Experiencia**

Es fundamental conocer el comportamiento y los aspectos técnicos del sistema de vía a implantar. En este caso además, al tratarse de la primera vez que se realizaría una obra de este tipo instalando vía en placa en la totalidad de la línea, cobra aún más importancia.

Las experiencias anteriores permiten detectar los puntos débiles de cada sistema e introducir modificaciones para obtener mejores resultados.

A partir de la información expuesta en el apartado 10.3., se ve como cada país ha implantado mayoritariamente la tipología de vía en placa que ellos mismos han desarrollado. Sin embargo, existen algunos sistemas alemanes como el Rheda cuya aplicación se ha extendido a un gran número de países en todas sus variantes.

En la Tabla 13 se presentan algunas de las realizaciones más destacadas en distintos sistemas de vía en placa.

Sistema	País de aplicación	Tramo	Longitud [km]
Edilon	España	Estación de Atocha	8,2
	Países Bajos	Best	3
Rheda Classic	Alemania	Túnel de Einmalberg, Túnel de Mühlberg, Túnel de Sengeberg, Berlín-Hamburgo, Berlín-Hannover	280,6
	Austria	Túnel de Säusentein	17,8
Rheda Dywidag	Alemania	Colonia-Rhein Main	31,2
Rheda 2000	Alemania	Nuremberg-Ingolstadt	72
	España	Túnel de Guadarrama, Túnel del Perthus, Túneles varios en el Eje Atlántico	530,6
	Taiwan	Taipei –Kaoshiung (estaciones)	88
	China	Wuhan- Guangzhou	1.980
	India	Udhampur-Katra	10
Rheda Berlín	Alemania	Zoo-Berlín Main Station, Erfurt-Leipzig, Colonia-Rhein Main	125,4
Züblin	Alemania	Colonia-Rhein Main, Túnel Markstein, Wittenberge-Dergenthin, Gardelegen	108
	China	Xi'an-Zhengzhou	920
Bögl	China	Pekín-Tianjin	232
	Alemania	Nuremberg-Ingolstadt	70
Stedef	Suiza	Túnel de Heitersberg, Zurich, Túnel de Grauholz	37,4
	España	Tramos diversos	55
	Francia	RER C, Túnel de Villecresnes, Interconexión TGV, RER E	28,9
IPA	Italia	Gemona del Friuli-Camia, Túnel de Canizzaro, Fiumicino aeropuerto, Roma-Florenia, Verona- Brennero	55
Shinkansen	Japón	Sanyo, Tohoku, Jeoetsu, Hokuriku, Tohoku, Kyushu, Nagano, Hokkaido	3.340
	Taiwan	Taipei-Kaoshiung	690

Tabla 13: Presencia de los distintos tipos de vía en placa en el mundo
Fuente: Elaboración propia a partir de CENIT (2008)

Se puede observar en esta tabla como en España los sistemas que se han instalado hasta el momento en túneles o estaciones han sido el Rheda 2000 y el sistema Edilon.

Finalmente, a modo de resumen se presenta la Tabla 14 que pone de manifiesto los sistemas más usados a nivel mundial.

Sistema	País de diseño	Longitud total [km]
Bögl	Alemania	4.391
Shinkansen	Japón	3.044
Rheda	Alemania	2.205
Sonneville-LVT	Suiza	1.031
Züblin	Alemania	606
Stedef	Francia	334
Edilon	Holanda	211
ÖBB-Porr	Austria	122,2
IPA	Italia	100
PACT	Gran Bretaña	95,4
SATO	Alemania	35,8
FFYS	Alemania	33,1
BTD	Alemania	32
ATD	Alemania	31,7
Getrac	Alemania	15,3
Walter	Alemania	9,4
FFC	Alemania	1
Heitkamp	Alemania	0,39
BTE	Alemania	0,39
BES	Alemania	0,39
Lawn Track/ Rasengleis	Alemania	0,39
Hochtief	Austria	0,39

Tabla 14: Longitud por sistema de vía en placa en el mundo
Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

Si bien es cierto que no hay un sistema que resulte el mejor en todos los criterios de decisión, existen varios que en su conjunto presentan un buen comportamiento y podrían adaptarse a la línea de estudio. Los que presentan unas características técnicas más favorables son: Bögl, Edilon, Rheda, Shinkansen y Züblin.

Por una parte, el sistema Rheda presenta un alto rendimiento de ejecución, pero por el contrario su comportamiento ante ruido y vibraciones no resulta muy satisfactorio.

Todos ellos presentan una superestructura con poca altura, aspecto muy interesante debido al gran número de túneles presentes en la Y vasca. En este sentido el sistema Edilon es el que tiene el menor valor. Este sistema presenta además un buen comportamiento ante el ruido y las vibraciones al contrario que el anterior. No obstante, su rendimiento de ejecución es muy bajo, se reduce hasta más de la mitad respecto al sistema Rheda.

Por lo que al sistema Bögl se refiere, presenta una gran modularidad facilitando así su reparación aunque por el contrario no presenta rendimientos muy altos de ejecución.

Por último, el sistema Shinkansen presenta una buena atenuación del ruido y gran modularidad. Aunque los rendimientos de ejecución resultan medios, el hecho que sea un sistema japonés de entrada tiene gran incidencia en los costes debido a la distancia de transporte.

Ya que todos estos sistemas están homologados para alta velocidad y presentan gran adaptabilidad a los desvíos, el factor decisivo es la experiencia en su uso.

A partir de la Tabla 14 se observa que los sistemas más usados de entre los analizados son el Bögl, el Shinkansen y el Rheda. Se ha ya mencionado lo que supondría el uso del sistema japonés Shinkansen en cuanto a transporte, además, la red japonesa no presenta demasiadas similitudes en cuanto a tráfico con la española. Por el conjunto de estos motivos, quedaría descartada para la Y vasca. De entre los dos sistemas alemanes restantes, y a pesar de que mundialmente el uso del Bögl resulta más extenso, en España no se ha aplicado con anterioridad. Por esto, se decide que el sistema más adecuado para la posible implantación en la Y vasca es el Rheda 2000.

12. Análisis económico de la solución escogida

Como se ha ya dicho, el objetivo principal del presente trabajo es plantear la posibilidad de implantar un sistema de vía en placa en la totalidad de la línea conocida como la Y vasca.

En apartados anteriores se han tratado los aspectos técnicos de los distintos sistemas disponibles actualmente. Finalmente, en este punto se realiza un análisis de rentabilidad del sistema escogido en el anterior apartado, el Rheda 2000, respecto al sistema de vía tradicional.

Antes de presentar los resultados es necesario exponer el tratamiento de datos realizado y las hipótesis consideradas para delimitar el alcance del estudio. Así pues, primeramente, se presenta el método usado para tomar una decisión respecto a la inversión a realizar para la construcción de la superestructura de vía, los datos y fuentes utilizadas y por último, los resultados obtenidos.

12.1. Metodología de cálculo

Para determinar la rentabilidad de un proyecto es decir, la relación entre los beneficios que se obtienen de una actividad determinada y los recursos usados para ponerla en marcha, se calcula el Flujo de Caja como la diferencia entre costes e ingresos que se producen a lo largo de la vida útil del proyecto.

En este caso de estudio se considerarán solo los costes ya que los beneficios obtenidos de la explotación de la línea no dependen del sistema de superestructura y por lo tanto son el elemento influyente en el análisis. Se considerarán como costes aquellos derivados de la inversión inicial para la construcción así como los costes de mantenimiento.

En la Figura 100 se presenta de forma más detallada los elementos que forman parte de este análisis y el formato con el que se trabajará.

Rentabilidad del sistema

Año	1	2	3	4	60
Inversión	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costes mantenimiento anual	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Renovación de carril y sujeciones	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Renovación completa del balasto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Desguarnecido	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tratamiento con tren mecanizado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costes totales										

Figura 100: Esquema de los elementos considerados en el análisis económico
Fuente: Elaboración propia a partir de A. García, A. Garola, G. Vélez et al (2014)

Dado que se tienen en cuenta los costes que genera el proyecto durante toda su vida útil, debe considerarse que estos se producen en distintos momentos en el tiempo. Por eso, es necesario realizar una conversión al presente de estos valores esperados mediante una tasa de descuento.

La tasa de descuento se encuentra implícita en el indicador usado para determinar el mejor sistema. Este indicador es el VAN (Valor Actual Neto) y se define como la suma algebraica del valor de los flujos de caja netos de un proyecto incluidos en un horizonte temporal. En este caso, al considerarse tan solo los costes, se usa el VAC (Valor Actual de Costes) como adaptación del indicador mencionado tal y como se muestra a continuación.

$$VAN = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{(B_i - C_i)}{(1+r)^i} - I_0 \qquad VAC = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{C_i}{(1+r)^i} + I_0$$

Donde

N: duración del proyecto

C_i : costes del proyecto en el periodo i

I_0 : inversión inicial

r: tasa de descuento

Un VAC mayor refleja que el proyecto tiene unos costes mayores y por lo tanto resulta menos atractivo para los inversores. Así pues, para determinar la mejor opción desde el punto de vista económico se buscará aquella con el menor valor de VAC posible.

Por último, el método usado para calcular la tasa de descuento es el CAPM (Capital Asset Pricing Model) que indica la rentabilidad mínima que un inversor exigiría para aportar recursos. Se calcula a partir de una rentabilidad de bajo riesgo como por ejemplo la deuda pública, a la cual se le añade una prima de riesgo. Teniendo en cuenta que los bonos españoles a 30 y 50 años presentan actualmente un valor entre el 2 y 3% y la prima de riesgo se encuentra también en valores en torno al 2%, se opta por usar un valor de la tasa de descuento del 5%.

12.2. Revisión bibliográfica de estudios anteriores

La revisión de estudios anteriores permite principalmente obtener valores de referencia en cuanto a costes de construcción y mantenimiento de este tipo de sistemas. Además, resulta útil para observar y comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con aquellos realizados por otros autores.

De hecho, numerosos autores han estado estudiando con anterioridad la viabilidad de distintos sistemas de vía en placa.

Para empezar, debido a los problemas de propagación de onda en suelos blandos, se decidió que la línea holandesa HSL-South se construiría mediante losas de hormigón

soportadas por pilas. Este hecho conllevó un estudio del coste del ciclo de vida realizado por la UIC y Esveld. Se consideraron algunos sistemas de vía en placa, entre ellos el sistema Rheda, de los cuales se tuvieron en cuenta los costes de superestructura sin cuantificar las losas de hormigón.

Se encontraron dificultades a la hora de contabilizar la disponibilidad de la vía, aspectos relacionados con la reducción del peso en obras de fábrica o el ahorro en elementos y medidas para reducir los niveles sonoros.

Una de las primeras conclusiones del estudio es la variación del coste de instalación teniendo en cuenta si se trata de un túnel o a cielo abierto obteniéndose un coste de 1,3 a 3 veces mayor. Por otro lado, con respecto a los costes de mantenimiento, los autores afirman que factores tales como tonelaje, velocidad y el enfoque de mantenimiento para lograr una alta fiabilidad, disponibilidad y seguridad son los puntos clave que influyen en los costes.

Respecto a los sistemas analizados, se obtuvo que el sistema embebido integrado en la subestructura de hormigón presentaba los costes iniciales y de mantenimiento menores. En cambio, el sistema Rheda presentaba los valores mayores en cuanto a coste inicial. Se utilizaron valores aproximados de costes de construcción y mantenimiento para la realización del estudio.

Se presentan en la Figura 101 los resultados obtenidos. En ellos se puede ver como el sistema de vía sobre balasto presenta los mayores costes.

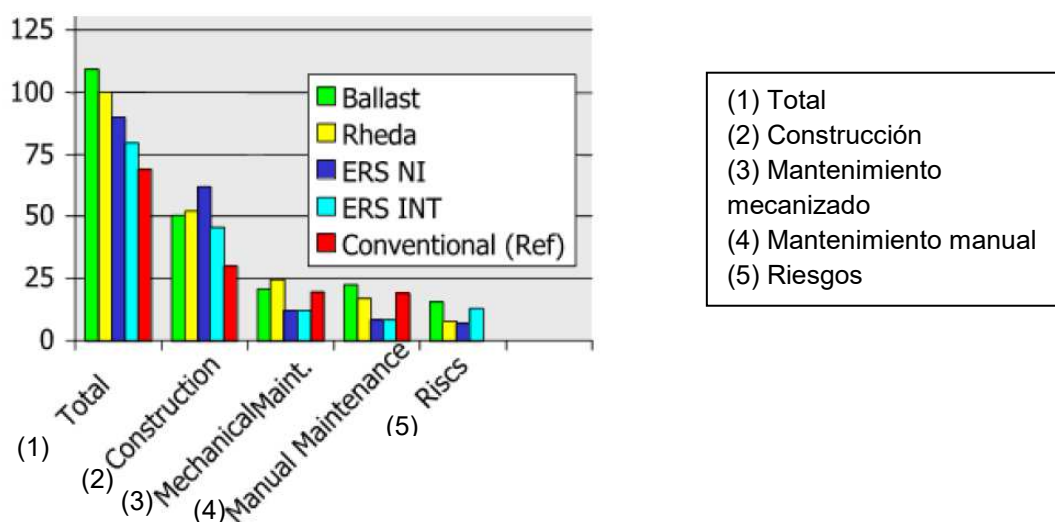


Figura 101: Costes anuales en €/m de tipologías de vía según el análisis realizado por Esveld
Fuente: C. Esveld (1999)

Esveld afirmó que con estos resultados se esperaba un cambio de tendencia a favor de los sistemas de vía en placa.

Otros estudios destacados en este ámbito son los realizados por la universidad holandesa de Delft en un tramo de prueba de 3 km en el cual se instaló el sistema de carril embebido. Los costes totales de dicho sistema resultaron un 20% menores que los asociados al sistema tradicional sobre balasto. Cabe destacar pero que en este

estudio no se tuvieron en cuenta los trabajos necesarios para la estabilización del terreno.

Se pueden observar los resultados obtenidos por Zoeteman en la Figura 102.

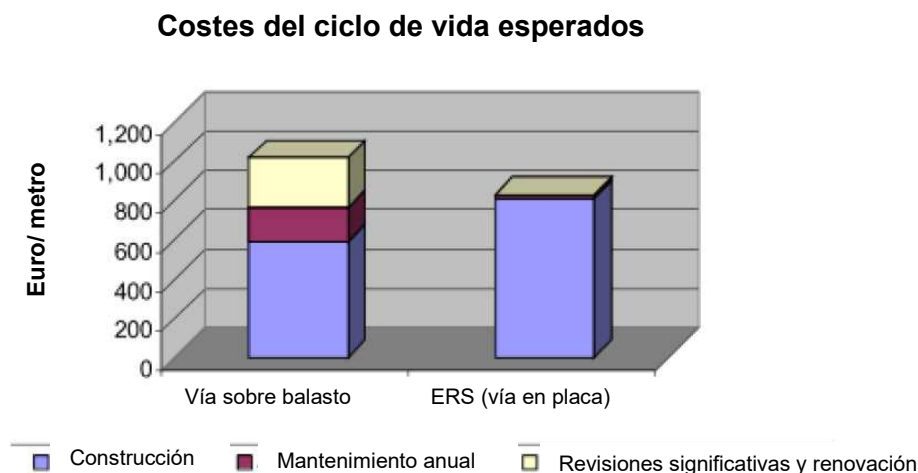


Figura 102: Resultados del análisis realizado por Zoeteman
Fuente: A. Zoeteman (1999)

Deben mencionarse también el estudio llevado a cabo por el CENIT (Centro de Innovación del Transporte).

El objetivo de este estudio fue la comparación de los costes asociados al sistema de balasto y vía en placa en la alta velocidad. El estudio se basa en el análisis de los costes de construcción y mantenimiento en una nueva línea mediante la revisión de datos de experiencias anteriores. También incluye el desarrollo de un método de análisis de los costes del ciclo de vida. Este permite la comparación de distintos parámetros influyentes en los costes y que difieren entre los sistemas analizados.

Las conclusiones que se obtuvieron son:

- La estrategia de financiación es crucial para disminuir los costes de construcción aunque la misma estrategia afecta proporcionalmente a ambos sistemas de superestructura. Así pues, es posible considerar los costes de construcción en el año 0 y de hecho, esta hipótesis se ha implementado también en el análisis realizado en el presente trabajo.
- Los factores más influyentes en los costes de mantenimiento son el volumen de tráfico y por supuesto la estrategia de mantenimiento.
- Resulta difícil determinar los costes de renovación de material debido a la falta de datos. En general además, los costes deben estar sujetos a revisiones continuas ya que cambian con el tiempo.
- Dependiendo de las cargas de tráfico a las que esté sometida la línea, existe una probabilidad mayor o menor de implantar con éxito la vía en placa. Este resultado se ve reflejado en la Figura 103.

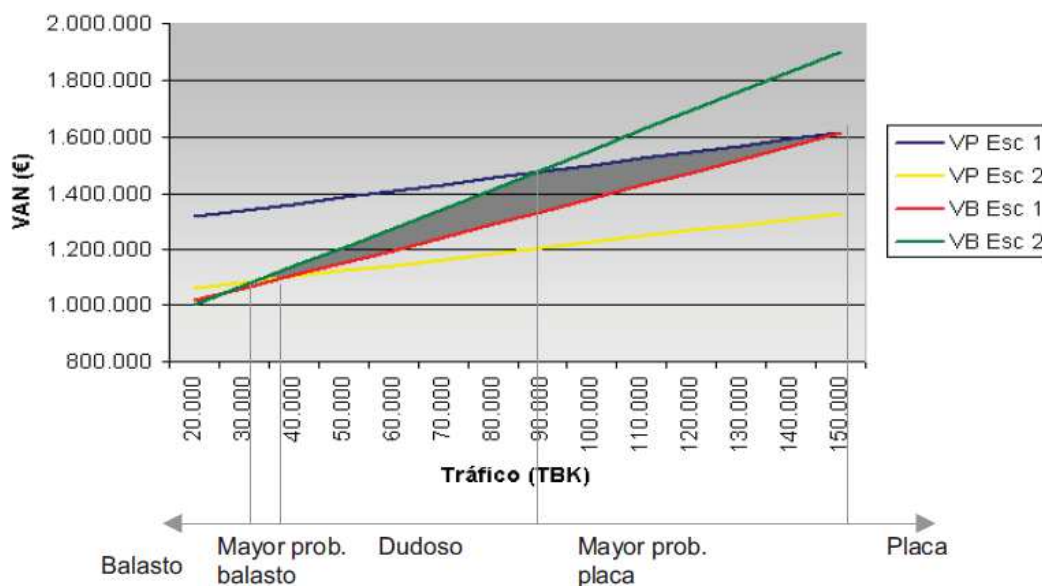


Figura 103: Rombo de decisión del sistema de vía según coste por km de vía y tráfico
Fuente: CENIT (2008)

Donde:

VP Esc 1: valor actual neto de la vía en placa con las condiciones más desfavorables al sistema de vía en placa.

VP Esc 2: valor actual neto de la vía en placa con las condiciones más favorables al sistema de vía en placa.

VB Esc 3: valor actual neto de la vía en balasto con las condiciones más favorables al sistema de vía en balasto.

VB Esc 4: valor actual neto de la vía en balasto con las condiciones más desfavorables al sistema de vía en balasto.

Se define así pues una región donde la vía en placa resulta la opción más aconsejable y esta es a partir de los 90000 TBK (carga en toneladas/día).

Por otra parte, el organismo fundado por la comisión europea INNOTRACK ha basado sus estudios en el objetivo de proporcionar un enfoque global de la gestión de infraestructuras para reducir los costes de inversión y mantenimiento en el sector ferroviario, especialmente para reducirlo en un 30%.

La conclusión que puede extraerse de estos estudios hace referencia a los costes de inversión inicial. Se dice que es durante la fase de instalación cuando puede obtenerse un mayor ahorro.

A partir de estos datos es posible hacerse una idea del posible resultado y especialmente de los órdenes de magnitud con los que se tratará.

12.3. Datos e hipótesis consideradas

Para el presente estudio se consideran las siguientes hipótesis:

- 1) Se realiza el análisis teniendo en cuenta tres escenarios:

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Totalidad de la línea construida en balasto	Totalidad de la línea construida mediante el sistema de vía en placa Rheda 2000	Sistema mixto. En puentes y túneles se aplica el sistema de vía en placa Rheda 2000 y en el resto, balasto.

Tabla 15: Escenarios considerados para el análisis económico
Fuente: Elaboración propia

- 2) Se consideran solo los costes como relevantes ya que los beneficios de la línea serán independientes del sistema que se construya.
- 3) Las operaciones necesarias y costes asociados a cada opción constructiva son las que figuran en la Tabla 16 y en la Tabla 17:

Escenario 1: vía sobre balasto		
Operación	Coste [€/m]	Periodicidad
Construcción	411,1	Inversión inicial, año 0
Mantenimiento habitual	26	Anual
Renovación del carril y sujeciones	345,6	Año 35
Renovación completa de balasto	360	Año 30
Tratamiento con tren mecanizado	97,68	Cada 3 años
Desguarnecido	226,54	Año 15 y 45

Tabla 16: Operaciones consideradas en el escenario 1
Fuente: Elaboración propia a partir de INECO (2010)

Escenario 2: vía en placa Rheda 2000		
Operación	Coste [€/m]	Periodicidad
Construcción	977,8	Inversión inicial, año 0
Mantenimiento habitual	13	Anual
Renovación del carril y sujeciones	345,6	Año 35

Tabla 17: Operaciones consideradas en el escenario 2
Fuente: Elaboración propia a partir de INECO (2010)

Para el tercer escenario se consideran las operaciones incluidas en ambos escenarios, realizando una mediana ponderada que considera el 70% de la línea ejecutada en vía en placa ya que se trata de túneles y puentes.

- 4) En todos los escenarios se considera que los costes de inversión se producen en el primer año y no se considera ningún método de financiación.
- 5) Se considera tasa de descuento del 5% determinada por el método CAPM.

- 6) No se considera un incremento en el mantenimiento en el caso de balasto en puentes u otras obras de fábrica así como un incremento en las transiciones placa-balasto. Así pues, se considera un coste de mantenimiento genérico para la totalidad de la línea.
- 7) Se considera mantenimiento constante a lo largo de los años.

Es necesario establecer estas hipótesis ya que el análisis económico está sujeto a cierta incertidumbre debido sobre todo a la dificultad de obtención de datos. Los datos económicos suelen ser confidenciales por lo que no resulta posible tener con exactitud los valores reales. Para tener en cuenta este efecto, se realiza también un análisis de sensibilidad de los costes que permite ver el efecto que tendría el cambio en alguna de las variables del proyecto. En este caso se considera una variación del 10% en todos los costes considerados.

12.4. Resultados obtenidos

En base a las consideraciones expuestas, se presentan en la Figura 104 los resultados obtenidos.

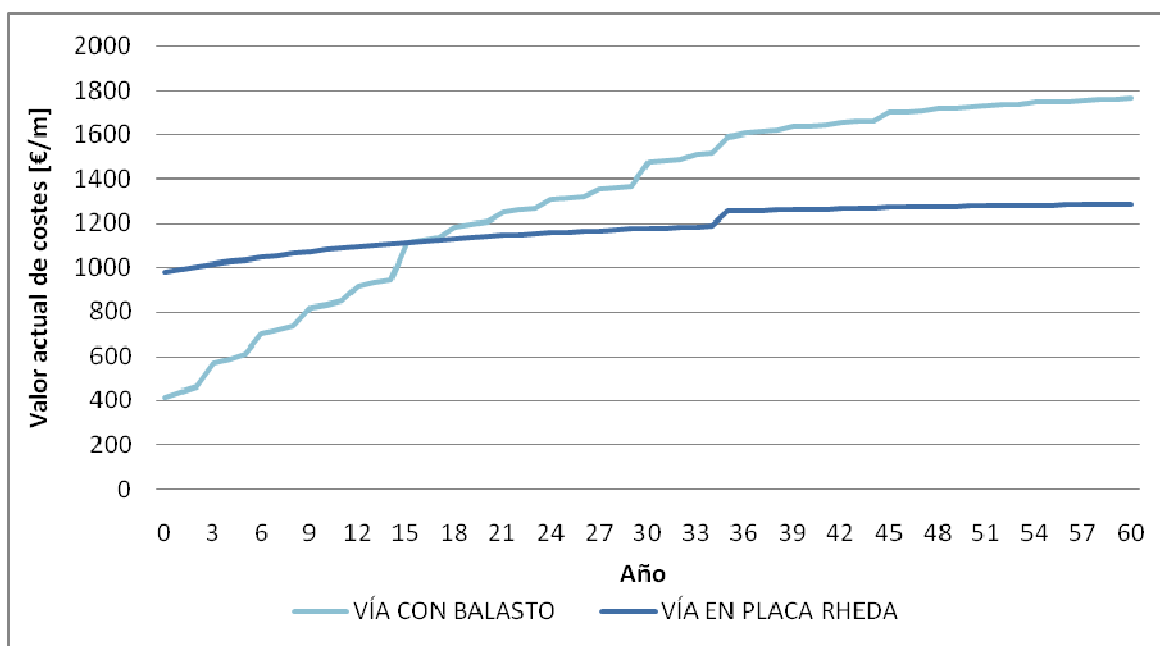


Figura 104: Evolución de los costes de ambos sistemas
Fuente: Elaboración propia

Lo primero que puede decirse respecto a los resultados obtenidos es que eran los esperados de acuerdo con los obtenidos por otros autores en estudios anteriores.

Se puede ver como inicialmente la inversión necesaria para la construcción de la vía en placa resulta significativamente superior al de la vía tradicional sobre balasto. Sin embargo, en esta última se observa un mayor crecimiento de los costes hasta el punto de superar los correspondientes al sistema Rheda 2000. Este crecimiento se debe al mayor coste de mantenimiento que requiere el balasto.

El punto de inflexión se produce normalmente entre los 15-20 años, en este caso es a partir del año 16 cuando se produce. Cabe destacarse que entre los años 14 y 16 los costes entre ambos sistemas resultan bastante similares. El efecto podría ser mayor si se tuviera en cuenta el desgaste del balasto en contacto con los tableros del puente o la dificultad de mantenimiento en los túneles.

A continuación, se contempla una posibilidad intermedia, donde las secciones de túneles y puentes se ejecutan con el sistema de vía en placa Rheda y las demás secciones con balasto. Se muestran en la Figura 105 la comparativa entre los tres escenarios planteados.

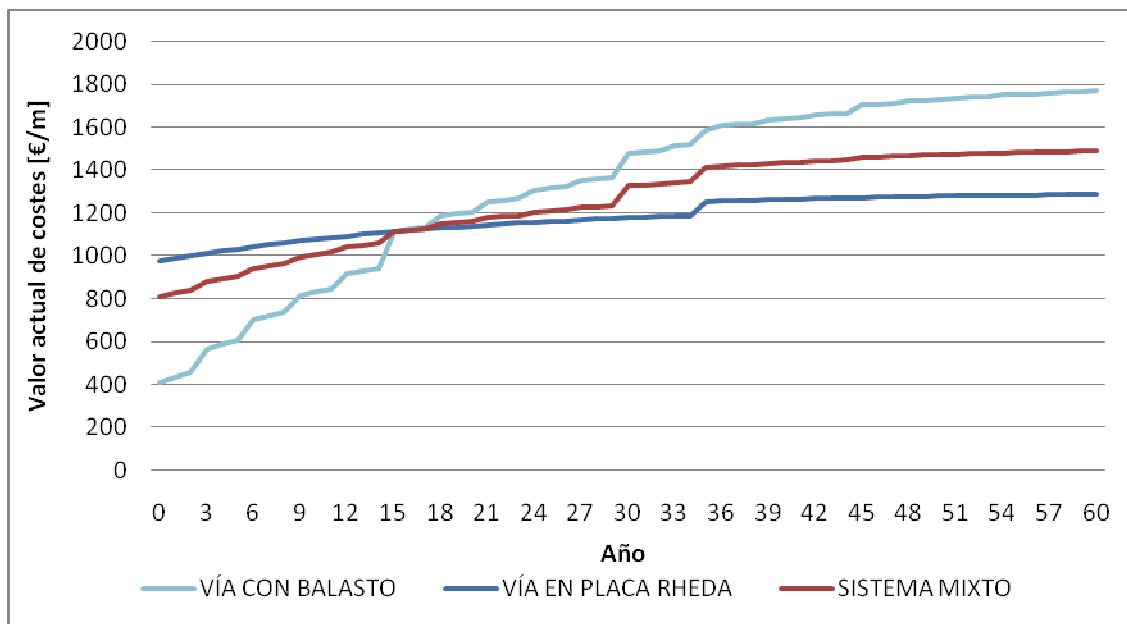


Figura 105: Evolución de los costes en los tres escenarios considerados
Fuente: Elaboración propia

Se observa como el sistema mixto presenta un coste intermedio respecto las dos situaciones anteriormente analizadas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en una situación real el mantenimiento alcanzaría valores mayores debido a los cambios de rigidez experimentados en las transiciones entre balasto y placa.

Ante estos datos, parece que la mejor opción desde el punto de vista económico pasaría por la implementación de vía en placa Rheda a lo largo de toda la línea. Sin embargo, cabe destacar que se han usado valores aproximados de costes y que los resultados se encuentran condicionados a un grado de incertidumbre.

Por eso, se realiza una variación del 10% en los costes considerados para, tal y como se ha dicho, observar la influencia que tienen sobre el resultado final.

Se presenta en la Figura 106 el resultado de estas variaciones de costes.

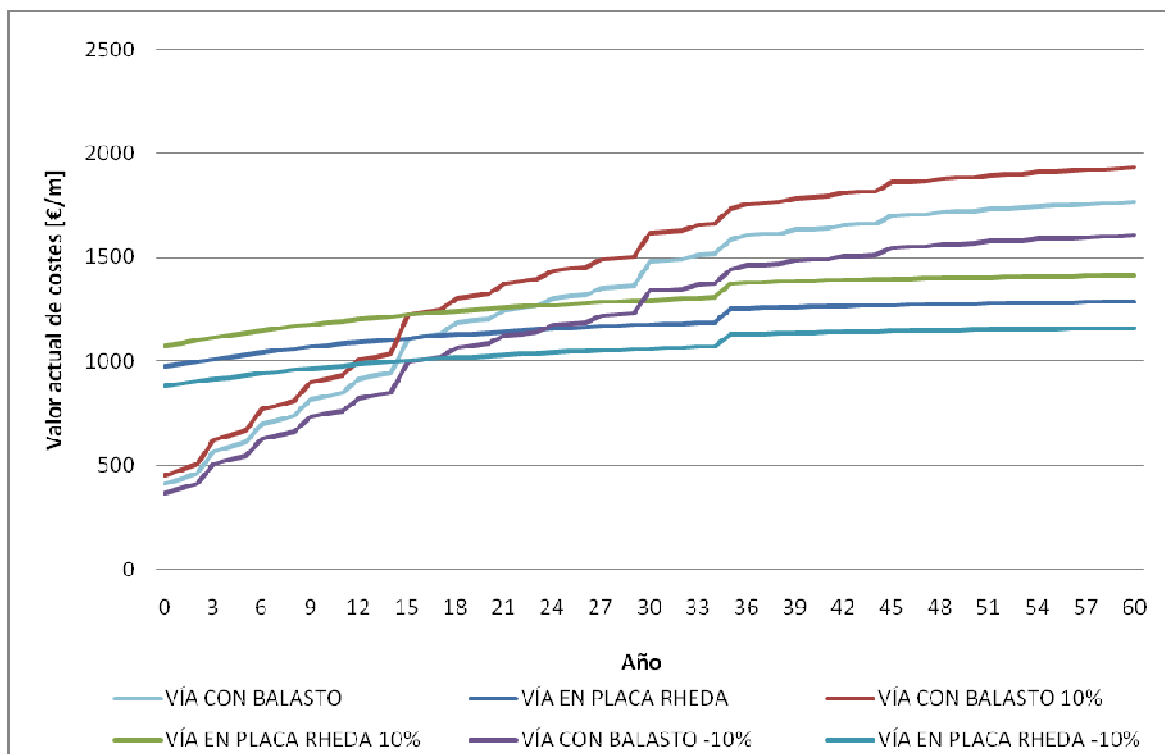


Figura 106: Análisis de sensibilidad
Fuente: Elaboración propia

La primera evidencia que se desprende de los resultados es que variar los costes de ambos sistemas a la vez tiene efecto en el valor de los costes pero como era de esperar, es en el año 16 donde se invierte la situación a favor de la vía en placa.

Sin embargo, lo que pretende evidenciarse mediante la Figura 106 es que la incertidumbre respecto los costes, antes mencionada, comporta definir un intervalo y no un solo punto en el que el sistema de vía en placa presenta unas condiciones más favorables en cuanto a los costes. De esta forma, puede decirse que a la larga el sistema de vía en placa presentará menores costes y empezará a ser un sistema más rentable que el tradicional entre los años 12 y 30.

Pueden verse los cálculos detallados para la obtención de los resultados presentados en el Anejo I.

13. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha analizado el interés de la implantación de la vía en placa en la alta velocidad española, abordando el tema tanto desde un punto de vista técnico como económico.

Para empezar se ha considerado necesario hacer un repaso de las características y evolución de la vía en el ferrocarril. Los cambios desde las primeras vías en las minas con vigas de madera o las vías con carriles apoyados sobre piedras hasta las actuales líneas de ferrocarril convencional y de alta velocidad, han evidenciado el importante papel del balasto en el sistema de vía así como sus características más relevantes.

Las conclusiones que se extraen de estas primeras reflexiones son, por una parte, que el balasto ha presentado un excelente comportamiento hasta el momento gracias a sus propiedades como la elasticidad y el amortiguamiento, el drenaje o la capacidad de repartir las cargas. Por otra parte, la facilidad de mantenimiento que presenta y los reducidos costes asociados a su implantación han hecho que se convierta en un sistema de éxito que se ha usado en prácticamente todas las líneas de ferrocarril del mundo.

No obstante, con la llegada de la alta velocidad se puso de manifiesto la necesidad de introducir cambios en los sistemas del momento adaptando trazados, modernizando la tecnología de seguridad y también modificando los sistemas de vía.

A partir de ensayos como el de las Landas en Francia, se determinó la gran influencia que tiene la velocidad en los esfuerzos sobre el carril y la importancia de los distintos componentes del peso total de un vehículo ferroviario con un papel importante por parte del peso no suspendido. Estas afirmaciones se reflejan en la conocida ecuación de Prud'Homme de la cual se deducen los aspectos a modificar para reducir las solicitaciones sobre la vía y hacer posible las circulaciones a alta velocidad. Estas modificaciones implican reducir el nivel de los defectos admisibles en los carriles, disponer de vías con la menor rigidez vertical posible y reducir al máximo el peso no suspendido de los vehículos.

A pesar de los esfuerzos realizados para adaptar las vías a la alta velocidad, el constante incremento en la demanda de viajeros y la tendencia hacia un modelo de ferrocarril cada vez más rápido han mostrado la dificultad, en algunos casos, para mantener la calidad de la vía sobre balasto y hacer frente a problemas como el vuelo del balasto. Este hecho junto con la mayor necesidad de operaciones de mantenimiento y los intervalos de tiempo con la vía libre cada vez menores han impulsado la implantación de la vía sobre placa.

Las ventajas más significativas que presenta la vía en placa respecto a la vía sobre balasto son:

- Mantenimiento reducido que permite una mayor capacidad de la línea por la disminución de las interrupciones del tráfico.
- Gran resistencia transversal.
- Eliminación del problema del vuelo del balasto.

- Menor altura de vía que permite reducir el volumen de excavación en los túneles y la sobrecarga permanente en los puentes y viaductos.
- Gran estabilidad geométrica debido a la rigidez de la placa.

Por estos motivos, algunos países como Japón, China y Alemania se han decantado por el uso de este sistema en gran parte de sus líneas de alta velocidad. Cabe destacar que Japón es el país con más experiencia en este campo, ya que después del gran deterioro que se produjo en su primera línea de alta velocidad con balasto el año 1964 optaron por construir las siguientes líneas con el sistema de vía sobre placa. Las circunstancias que produjeron este deterioro fueron una combinación entre las malas condiciones que presentaba el terreno, la falta de medios tecnológicos y la complicada topografía que implicaba grandes obras de fábrica.

La aplicación de la vía en placa supuso grandes ventajas sobre todo en materia de costes de mantenimiento ya que con las líneas sobre balasto era necesaria una mayor frecuencia de intervención difícil de combinar con las elevadas demandas a las que están sometidas las líneas japonesas.

Después del éxito obtenido en estas líneas, parece que el sistema de vía en placa resulta la opción más favorable para satisfacer las exigencias de confort y seguridad a altas velocidades con un mantenimiento reducido. No obstante, al realizar un análisis de la situación de la alta velocidad en los distintos países del mundo, se detecta que no todos los países se acogen a esta tendencia sino que optan por el balasto y solo la aplicación puntual de la vía en placa. Entre estos países se encuentra España, donde por el momento, la vía en placa tan solo se ha aplicado en tramos concretos como túneles, puentes, estaciones e inmediaciones urbanas.

Tras el análisis de las propiedades de la vía en placa y las experiencias de los distintos países que disponen de alta velocidad se concluye que las situaciones en las que la construcción de una nueva línea con el sistema de vía en placa resulta más competitivo que el sistema tradicional son:

- Túneles de gran longitud.
- Líneas con gran cantidad de obras de fábrica como túneles, puentes y viaductos.
- Líneas con mucha densidad de tráfico o con tráfico simultáneo de viajeros y mercancías.
- Líneas que provocan un fuerte impacto ambiental.
- Líneas a las que se les aplican valores límites a su trazado, aproximando el peralte de las curvas a límite de explotación admisible, y que están sometidas a tráficos pesados (tráfico no homogéneo).
- Velocidades mayores a 250 km/h.
- Estaciones.

Es importante destacar el hecho que la vía en placa se debe implantar en líneas de nueva construcción ya que de instalarse en una vía en servicio implicaría una interrupción total de la circulación de los trenes y grandes consecuencias en la movilidad.

En el caso español, la posible aplicación de este sistema se reduce a la nueva línea de alta velocidad que conectará el País Vasco con otras regiones españolas y con Francia, conocida como la Y vasca. Pero, ¿se dan las condiciones óptimas para la implantación de la vía en placa? ¿Resulta una opción técnica y económicamente viable?

Muchas son las dudas que se generan en torno a esta opción constructiva debido sobre todo a la mayor dificultad de ejecución. Es por eso, que se han analizado las características que más influyen en el proceso de planificación de una línea. Se ha constatado que la futura Y vasca soportará un tráfico de entre 3-4 M de viajeros al año, cifra parecida a otras líneas de ferrocarril español y que permite a su vez introducir trenes de mercancías, hecho que puede resultar interesante debido a la situación geográfica del País Vasco. Además, la orografía de la zona resulta un aspecto muy relevante ya que condiciona fuertemente el trazado provocando que el tren deba circular más del 60% de su recorrido en túnel y el 10% en túnel, dejando a cielo abierto tan solo un 30% de su totalidad. Este último hecho resulta decisivo a la hora de considerar la Y vasca adecuada para la implantación de la vía en placa.

A lo largo de los años se han desarrollado multitud de sistemas de vía sobre placa que se agrupan en diferentes categorías según sus características. Todos ellos presentan puntos fuertes y débiles, pero persiguen el objetivo de permitir el continuo aumento de la velocidad de circulación y reducir la necesidad de mantenimiento sin dejar de ofrecer el máximo confort y cumpliendo las exigencias y expectativas del servicio.

Para la línea de estudio se ha escogido la tipología de vía en placa alemana Rheda 2000. La elección se basa en criterios técnicos como el alto rendimiento de construcción, la adaptabilidad a los desvíos y la poca altura de construcción, aunque el factor más determinante es la experiencia previa que España tiene en la construcción en túnel de este sistema.

Por último, la evaluación en términos económicos suele ser la herramienta que permite decidir si un proyecto es rentable o por el contrario no debe llevarse a cabo o postergarse su inicio. En base a estudios anteriores, se preveía que el factor que resultaría más atractivo de la vía en placa en términos económicos sería su menor coste total respecto al balasto gracias a que la inversión inicial se compensaría por un menor mantenimiento a lo largo de los años.

Después del análisis realizado se concluye que ciertamente se produce este efecto de compensación y que al cabo de unos 15-20 años la vía en placa resulta más rentable que el sistema sobre balasto. Así pues parece razonable la construcción de la Y vasca mediante este sistema.

Se abre de esta forma una nueva concepción de la superestructura de vía en España que permitirá la construcción de líneas sujetas a condicionantes orográficos complicados, con garantías de satisfacer la evolución en términos de velocidades y con capacidad de adaptación a mejoras en su proceso constructivo desde un punto de vista más rentable que el que puede ofrecer el sistema llevado a cabo hasta la actualidad.

14. Recomendaciones

La principal recomendación que se deriva de este trabajo es la necesidad de particularizar y realizar un estudio más específico y detallado para la línea de alta velocidad vasca, sobre todo por lo que al análisis económico se refiere.

Como se ha podido ver, los resultados obtenidos en el presente trabajo apuntan que la implantación de la vía en placa en dicha línea presentaría ventajas económicas respecto al sistema tradicional. Además, la posible implantación de la vía en placa en la totalidad de la Y vasca cobra especial importancia debido a que sería la primera vez que en España se realizaría una línea de alta velocidad con únicamente esta solución constructiva en todo su recorrido.

Si bien es cierto que el análisis económico se encuentra sujeto a cierta incertidumbre debido a la imposibilidad de conocer realmente los costes exactos y su evolución, de entrada, la vía en placa resultaría más rentable que el sistema con balasto después de unos 15-20 años de explotación de la línea. Para poder conocer con exactitud el tiempo necesario para que el menor mantenimiento compense la mayor inversión inicial necesaria en la vía en placa así como los diferentes costes considerados en apartados anteriores, debería realizarse un estudio específico de la Y vasca teniendo en cuenta los valores reales y detallados del tráfico así como la geometría exacta del trazado para conocer los desvíos y los distintos elementos o situaciones que pudieran introducir variaciones en los costes considerados.

Por este motivo, no puede afirmarse categóricamente que para la construcción de la Y vasca debería usarse el sistema de vía en placa Rheda sino que el presente estudio debe considerarse como un análisis preliminar para tener en cuenta la solución de la vía en placa como una opción constructiva.

Ante los resultados que muestran la factibilidad de la vía en placa no solo a nivel económico sino técnico debido a la gran cantidad de obras de fábrica presentes en la línea ferroviaria de estudio, sería conveniente incluir la posibilidad de su implantación desde el inicio de la planificación de la línea. De esta forma, se podrían analizar aspectos constructivos que podrían resultar críticos, introducirse nuevas variables de estudio y en definitiva conocer de forma más precisa los condicionantes a los que estaría sujeto dicho sistema.

Destacar también que el objetivo perseguido no es tan solo construir con la menor inversión posible que permita ofrecer el servicio adecuado y cumpla con las exigencias requeridas sino que el medio ambiente juega también un papel importante. La utilización de la vía en placa permite una mayor integración ambiental gracias a su menor deterioro geométrico bajo condiciones extremas de sus parámetros de diseño, evitando la construcción de muchos túneles y ofreciendo una menor ocupación.

Es por eso que se recomienda también realizar un estudio que tenga en cuenta aspectos ambientales así como los efectos que se producirían en la movilidad al facilitar la conexión de mercancías y viajeros con una gran capacidad y velocidad.

15. Bibliografía

- ABC Economía. (2015). *España es el país con más kilómetros de AVE por habitante, pero el de menos pasajeros*.
- ADIF. (2012). Adif finaliza la primera fase de montaje de la vía entre La Sagrega y Mollet del Vallès (Barcelona).
- ADIF. (2017). *Acceso de Alta Velocidad a Toledo*.
- ADIF. (2007). *Conceptos básicos ferroviarios*.
- Aranda, E. (2006). *Factibilidad e interés de las relaciones transversales de alta velocidad en europa*. Barcelona.
- ARUP. (2017). *General guidance for low vibration slab track*. Britpave.
- Avramovic, N. (2010). *Comparison of Ballast and Ballasless Tracks*. Graz: Institute for Railway Engineering and Transport Economy.
- Balfour Beatty. (2006). *Embedded Rail System*.
- Bermejo, R. (2004). *Análisis de rentabilidad del proyecto de la "Y" vasca y bases para una estrategia ferroviaria alternativa*. Bilbao.
- Bilow, D. N. y Randich, G. M. (2000). *Slab track fot the next 100 years*.
- CENIT. (2008). *Análisis de los costes de inversión asociados a cada sistema de vía*.
- Cortina, E. (2013). *La utilización de la vía en placa en líneas de alta velocidad: aplicación práctica*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cortinat, R., García, J. D., Gómez, J. et al (2009). Primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho procedente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) y resina de matriz polimérica. *Revista de Obras Públicas* nº 3505 , p. 7-20.
- D2S International. (s.f.). *Noise and vibration engineering for rail transport*. Bélgica.
- Darr, E. (2000). Ballastless Track: Design Types, Track Stability, Maintenance and System Comparison. *ETR*, p. 138-148.
- Dueñas, R. A. (2007). *Elementos de ayuda para la toma de decisiones sobre la utilización de vías sin balasto*.
- Echebarria, C. (2003). *El Tren de Alta Velocidad en Euskadi: un proyecto polémico*. Universidad del País Vasco.
- Escolano, J. (1998). La "vía en placa" en la DB AG. *Revista de Obras Públicas* nº 3382, p. 21-34.
- Estradé, J. M. (1998). La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad de nuestro país. *Resvista de Obras Públicas* nº 3372, p. 63-74.

- Estradé, J. M. (1991). La superestructura de vía sin balasto: perspectivas de su aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad. *Revista de Obras Públicas*, p. 9-28.
- Esveld, C. (1997). *Innovations in Railway Track*. TU Delft.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Delft: TU Delft Publications.
- Esveld, C. (2003). *Recent developments in slab track*. European Railway Review.
- Esveld, C. (1999). *SLAB TRACK: A Competitive Solution*. Delft .
- Falkner, H. (2000). *Innovation: steel fibre concret for jointless rail tracks*. Universidad de Braunschweig.
- Fonseca, P. (2003). *Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical*. Barcelona.
- García, Á., Garola, À. , Vélez, G. et al (2014). *Model i valor econòmic de les concessionàries d'autopistes a Catalunya*. Observatori viari de Catalunya.
- González, F. J. (2010). *Ingeniería ferroviaria*. UNED.
- Grañón, N. (2003). *Tendencias en el diseño de vías de alta velocidad*. Barcelona.
- Guerrero, J. A. (2017). *Ingeniería de Vías Férreas*. Méjico: Lulu.
- Huesmann, H. (2005). Slab track in Germany. *Rail Technology Review* , p. 13-22.
- INECO. (2010). *Análisis de costes Vía en Placa vs Balasto*.
- Izvolt, L. (2014). *Historical Development and Applications of Unconventional Structure of Railway Superstructure of the Railway Infrastructure of the Slovak Republic*.
- Jaensch, E. (2003). Slab track for high speed lines in Germany. *European Railway Review* , p. 77-81.
- Kleeberg, J. (2009). New development stage of RHEDA 2000. *European Railway Review* , p. 56-60.
- Koyama, Y. (1997). *Railway Construction in Japan*. Japan Railway and Transport Review.
- Leykauf, G. (2005). The journey of ballastless track. *European Railway Review* , p. 59-68.
- Leykauf, G. y Lechner, B. (2001). *Design of Ballastless Track Structures using sleeper panels fixed on concrete or asphalt pavements*.
- Lichtberger, B. (2005). *Track compendium*. Eurail Press.
- Max Bögl. (2014). *FF Bögl. Progress in built on ideas*.

Melis, M. (2006). Terraplenes y balasto en Alta Velocidad Ferroviaria. Segunda parte: Los trazados de Alta Velocidad en otros países. *Revista de Obras Públicas* nº 3468, p.7-26.

Michas, G. (2012). *Slab Track System for High- Speed Railways*. Stockholm: Royal Institute of Technology.

Ministerio de Fomento. (2015). *Instrucción para el Proyecto y Construcción de Obras Ferroviarias IF-3*.

Miura, S., Takai, H. et al(1998). The Mechanism of Railway Tracks. *Japan Railway and Transport Review*, p.38-45.

Mörscher, J. (2015). *Slab Track Roadbeds in Germany. Implementation and Experience*. . DB Netz AG.

Münchschwander, P. (1999). Ballastless track as a basis for High-speed traffic. *Deutsche Bahn Supplement. European Railway Review* .

Ollivier, G., Sondhi, J. y Zhou, N. (2014). *High-Speed Railways in China: A look at construction costs*. China Transport Topics nº9.

Ordóñez, J. L. (2007). Dossier Vía en placa. *Vía Libre*, p. 61-70.

Peña, M. (2003). Tramos de ensayo de vía en placa en la línea del Corredor del Mediterráneo para su explotación a alta velocidad I. Diseño y construcción. *Revista de Obra Públicas* nº 3431, p. 57-68.

Pichler, D. (2014). *Slab Track System ÖBB-PORR. Elastically Supported Slab*. Estocolmo.

Pita, A. L. (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Barcelona: Edicions UPC.

Pita, A. L. (2017). *Interacción vía-vehículo en el ferrocarril. Un enfoque evolutivo*. Barcelona: Garceta.

Pita, A. L. (2014). *Líneas de ferrocarril de alta velocidad. Planificación, construcción y explotación*. Barcelona: Garceta.

Porr. (2012). *Slab Track Austria. System ÖBB-PORR elastically supported slab*. Austria.

Puebla, J. y Fernández, A. (2000). Para altas velocidades, ¿Vía con o sin balasto? *Revista de obras públicas* nº 3401, p. 29-40.

Rail One. (2012). *Getrac Ballastless Track System*.

Rail One. (2011). *Rheda 2000 Ballastless track system*.

Review, G. R. (2005). *The journey of ballastless*.

Rodríguez, L. (2014). *La línea Tokaido Shinkansen, más de 50 años de innovación ferroviaria en Japón*.

Rose, J. G. (2013). *Selected in-track applications and performances of hot-mix asphalt trackbeds*. Lexington.

Round, D. (1993). *Non-ballasted track*. British Rail Research.

Schilder, R. y Diederich, D. (2008). Installation quality of slab track-a decisive factor for maintenance. *Rail Technology Review* , p.17-20.

SFF Ingenieure. (2012). *Slab track systems on different substructures*.

Sonneville. (2011). *Low vibration track system (LVT). System description*. Sonneville AG.

Sugrue, W. (2013). *Track for High Speed*. París: UIC.

UIC. (2014). *Design requirements and improved guidelines for design (track loading, resilience and RAMS)*.

UIC. (2017). *High speed traffic in the world*.

Universidad Politécnica de Cartagena. *Apuntes para la asignatura de Ferrocarriles*.

Vía Libre. (1976). *La "vía en placa", nuevo sistema para ganar velocidad y reducir costos*. La revista del ferrocarril.

Wang, J. (2011). *The Ballastless Track Technology For China High-Speed Line*. CRH.

Zoeteman, A. y Esveld, C. (1999). *Evaluating track structures: life cycle cost analysis as a structured approach*.

Züblin. *On the track with Züblin*. Züblin AG.

15.1. Otra bibliografía

ADIF Alta Velocidad. (Última consulta: Marzo 2018). Disponible en:
http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/index.shtml

Apuntes Ferrocarriles. (Última consulta: Mayo 2018)

CONSTRUBLOG. (Última consulta: Abril: 2018). Disponible en:
<https://construblogspain.wordpress.com/2014/02/11/via-en-placa/>

Edilon sedra. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:
<https://www.edilonsedra.com>

EUSKALYVASCA. (Última consulta: Marzo 2018). Disponible en:
<http://www.euskalyvasca.com/>

Ferrovie dello Stato Italiane. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:
<https://www.fsitaliane.it/>

Fiebigers. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en :

<http://fiebigers.de/rheda-spezial.html>

Global Railway Review. (Última consulta: Febrero 2018). Disponible en:

<https://www.globalrailwayreview.com/article/2681/the-journey-of-ballastless-track/>

ICE . (Última consulta: Marzo 2018). Disponible en:

<https://www.bahn.com/en/view/trains/long-distance/ice-ice-sprinter.shtml>

Japan Society of Civil Engineers. (Última consulta: Abril 2018) Disponible en:

<http://www.jsce-int.org/at/achievement/civil/2011>

Johomaps. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

<http://www.johomaps.com/>

Midwest High Speed Rail Association. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

<https://www.midwesthsr.org/south-korea>

Nippon. Información integral sobre Japón. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

<https://www.nippon.com/es/features/h00077/>

Railtech Sufetra. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

<https://construblogspain.wordpress.com/2014/02/11/via-en-placa/>

Sistema MLG. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

http://www.sistemamlg.es/sistemaMLG/index.php?apartado=plan_trabajo&subapartado=producto_1

Travel China Guide. (Última consulta: Abril 2018). Disponible en:

<https://www.travelchinaguide.com/china-trains/taiwan/>

Anejo I. Cálculos del análisis económico

En este anejo se presentan los cálculos realizados en el análisis económico de los escenarios planteados en el apartado 12.3.

Escenario 1

COSTES DE LA VÍA SOBRE BALASTO	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	411,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tren mecanizado	0	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	411,10	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68	26,00
VALOR ACTUAL DE COSTES	411,10	24,76	23,58	106,84	21,39	20,37	92,29	18,48	17,60	79,73	15,96
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	411,10	435,86	459,44	566,28	587,67	608,05	700,34	718,82	736,41	816,14	832,10

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68
0	0	0	0	227	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	123,68	26,00	26,00	350,22	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68
15,20	68,87	13,79	13,13	168,46	11,91	11,34	51,39	10,29	9,80	44,39	8,89	8,46	38,35
847,30	916,17	929,96	943,09	1111,55	1123,46	1134,81	1186,20	1196,49	1206,29	1250,68	1259,57	1268,04	1306,38

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345,60	0	0	0
0	0	0	0	0	360,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	483,68	26,00	26,00	123,68	26,00	371,60	123,68	26,00	26,00
7,68	7,31	33,13	6,63	6,32	111,91	5,73	5,46	24,72	4,95	67,37	21,35	4,28	4,07
1314,06	1321,37	1354,50	1361,13	1367,45	1479,36	1485,09	1490,55	1515,27	1520,22	1587,59	1608,94	1613,22	1617,29

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68	0
0	0	0	0	0	0	227	0	0	0	0	0	0	0
123,68	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	350,22	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68	26,00
18,45	3,69	3,52	15,93	3,19	3,04	38,98	2,76	2,62	11,89	2,38	2,27	10,27	2,06
1635,73	1639,43	1642,94	1658,88	1662,07	1665,11	1704,09	1706,84	1709,47	1721,36	1723,74	1726,01	1736,28	1738,33

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	97,68	0	0	97,68	0	0	97,68
0	0	0	0	0	0	0	0
26,00	123,68	26,00	26,00	123,68	26,00	26,00	123,68
1,96	8,87	1,78	1,69	7,66	1,53	1,46	6,62
1740,29	1749,17	1750,94	1752,63	1760,30	1761,83	1763,30	1769,92

Escenario 2

COSTES SOBRE LA VÍA EN PLACA RHEDA	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	977,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	977,80	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
VALOR ACTUAL DE COSTES	977,80	12,38	11,79	11,23	10,70	10,19	9,70	9,24	8,80	8,38	7,98
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	977,80	990,18	1001,97	1013,20	1023,90	1034,08	1043,78	1053,02	1061,82	1070,20	1078,18

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
7,60	7,24	6,89	6,57	6,25	5,96	5,67	5,40	5,14	4,90	4,67	4,44	4,23	4,03
1085,78	1093,02	1099,92	1106,48	1112,74	1118,69	1124,36	1129,76	1134,91	1139,81	1144,47	1148,92	1153,15	1157,18

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345,6	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	358,60	13,00	13,00	13,00
3,84	3,66	3,48	3,32	3,16	3,01	2,86	2,73	2,60	2,47	65,01	2,24	2,14	2,04
1161,02	1164,68	1168,16	1171,48	1174,63	1177,64	1180,51	1183,23	1185,83	1188,31	1253,32	1255,56	1257,70	1259,74

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
1,94	1,85	1,76	1,67	1,60	1,52	1,45	1,38	1,31	1,25	1,19	1,13	1,08	1,03
1261,68	1263,52	1265,28	1266,96	1268,55	1270,07	1271,52	1272,89	1274,21	1275,46	1276,65	1277,78	1278,86	1279,89

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,77	0,73	0,70
1280,87	1281,80	1282,69	1283,54	1284,34	1285,11	1285,84	1286,53

Escenario 3

VÍA MIXTA	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	807,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tren mecanizado	0	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	807,79	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20	16,90
VALOR ACTUAL DE COSTES	807,79	16,10	15,33	39,91	13,90	13,24	34,48	12,01	11,44	29,78	10,38
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	807,79	823,89	839,21	879,13	893,03	906,27	940,75	952,76	964,20	993,98	1004,36

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30
0	0	0	0	67,96	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	46,20	16,90	16,90	114,17	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20
9,88	25,73	8,96	8,54	54,92	7,74	7,37	19,20	6,69	6,37	16,58	5,78	5,50	14,33
1014,24	1039,97	1048,93	1057,47	1112,38	1120,12	1127,50	1146,70	1153,38	1159,75	1176,34	1182,11	1187,62	1201,94

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345,60	0	0	0
0	0	0	0	0	360,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	406,20	16,90	16,90	46,20	16,90	362,50	46,20	16,90	16,90
4,99	4,75	12,38	4,31	4,11	93,99	3,72	3,55	9,23	3,22	65,72	7,98	2,78	2,65
1206,93	1211,69	1224,06	1228,37	1232,48	1326,47	1330,19	1333,74	1342,97	1346,19	1411,91	1419,88	1422,66	1425,31

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30	0
0	0	0	0	0	0	67,96	0	0	0	0	0	0	0
46,20	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	114,17	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20	16,90
6,89	2,40	2,29	5,95	2,07	1,97	12,71	1,79	1,71	4,44	1,55	1,47	3,84	1,34
1432,20	1434,60	1436,89	1442,84	1444,91	1446,89	1459,59	1461,39	1463,09	1467,53	1469,08	1470,56	1474,39	1475,73

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	29,30	0	0	29,30	0	0	29,30
0	0	0	0	0	0	0	0
16,90	46,20	16,90	16,90	46,20	16,90	16,90	46,20
1,27	3,31	1,15	1,10	2,86	1,00	0,95	2,47
1477,00	1480,32	1481,47	1482,57	1485,44	1486,43	1487,38	1489,86

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

VÍA CON BALASTO VARIACIÓN +10%	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	452,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tren mecanizado	0	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	452,21	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05	28,60
VALOR ACTUAL DE COSTES	452,21	27,24	25,94	117,52	23,53	22,41	101,52	20,33	19,36	87,70	17,56
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	452,21	479,45	505,39	622,91	646,44	668,85	770,37	790,70	810,05	897,75	915,31

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	107,448	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45
0	0	0	0	249,19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	136,05	28,60	28,60	385,24	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05
16,72	75,76	15,17	14,44	185,31	13,10	12,48	56,53	11,32	10,78	48,83	9,78	9,31	42,18
932,03	1007,79	1022,96	1037,40	1222,71	1235,81	1248,29	1304,82	1316,14	1326,92	1375,75	1385,53	1394,84	1437,02

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345,60	0	0	0
0	0	0	0	0	360,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	496,05	28,60	28,60	136,05	28,60	374,20	136,05	28,60	28,60
8,45	8,04	36,44	7,30	6,95	114,77	6,30	6,00	27,19	5,44	67,84	23,49	4,70	4,48
1445,47	1453,51	1489,95	1497,25	1504,20	1618,97	1625,27	1631,27	1658,47	1663,91	1731,75	1755,24	1759,94	1764,42

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45	0
0	0	0	0	0	0	249,19	0	0	0	0	0	0	0
136,05	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	385,24	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05	28,60
20,29	4,06	3,87	17,53	3,51	3,34	42,88	3,03	2,89	13,08	2,62	2,49	11,30	2,26
1784,71	1788,78	1792,64	1810,17	1813,68	1817,02	1859,90	1862,93	1865,82	1878,90	1881,52	1884,01	1895,31	1897,57

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	107,45	0	0	107,45	0	0	107,45
0	0	0	0	0	0	0	0
28,60	136,05	28,60	28,60	136,05	28,60	28,60	136,05
2,15	9,76	1,95	1,86	8,43	1,69	1,61	7,28
1899,73	1909,49	1911,44	1913,30	1921,73	1923,42	1925,03	1932,31

VÍA EN PLACA RHEDA VARIACIÓN +10%	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	1075,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	1075,58	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
VALOR ACTUAL DE COSTES	1075,58	13,62	12,97	12,35	11,76	11,20	10,67	10,16	9,68	9,22	8,78
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	1075,58	1089,20	1102,17	1114,52	1126,29	1137,49	1148,16	1158,33	1168,00	1177,22	1186,00

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
8,36	7,96	7,58	7,22	6,88	6,55	6,24	5,94	5,66	5,39	5,13	4,89	4,66	4,43
1194,36	1202,32	1209,91	1217,13	1224,01	1230,56	1236,80	1242,74	1248,40	1253,79	1258,92	1263,81	1268,47	1272,90

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	380,16	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	394,46	14,30	14,30	14,30
4,22	4,02	3,83	3,65	3,47	3,31	3,15	3,00	2,86	2,72	71,51	2,47	2,35	2,24
1277,12	1281,15	1284,98	1288,62	1292,10	1295,41	1298,56	1301,56	1304,42	1307,14	1378,65	1381,12	1383,47	1385,71

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
2,13	2,03	1,93	1,84	1,75	1,67	1,59	1,52	1,44	1,37	1,31	1,25	1,19	1,13
1387,84	1389,87	1391,81	1393,65	1395,41	1397,08	1398,67	1400,18	1401,63	1403,00	1404,31	1405,56	1406,75	1407,88

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
1,08	1,03	0,98	0,93	0,89	0,84	0,80	0,77
1408,95	1409,98	1410,96	1411,89	1412,77	1413,62	1414,42	1415,19

VÍA CON BALASTO VARIACION - 10%	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	369,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tren mecanizado	0	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	369,99	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31	23,40
VALOR ACTUAL DE COSTES	369,99	22,29	21,22	96,16	19,25	18,33	83,06	16,63	15,84	71,75	14,37
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	369,99	392,28	413,50	509,66	528,91	547,24	630,30	646,93	662,77	734,52	748,89

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91
0	0	0	0	203,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	111,31	23,40	23,40	315,20	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31
13,68	61,98	12,41	11,82	151,62	10,72	10,21	46,25	9,26	8,82	39,95	8,00	7,62	34,51
762,57	824,55	836,96	848,78	1000,40	1011,12	1021,33	1067,58	1076,84	1085,66	1125,61	1133,61	1141,23	1175,75

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345,6	0	0	0
0	0	0	0	0	360,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	471,31	23,40	23,40	111,31	23,40	369,00	111,31	23,40	23,40
6,91	6,58	29,81	5,97	5,68	109,05	5,16	4,91	22,25	4,45	66,90	19,22	3,85	3,66
1182,66	1189,24	1219,05	1225,02	1230,71	1339,76	1344,91	1349,82	1372,07	1376,53	1443,42	1462,64	1466,49	1470,15

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91	0
0	0	0	0	0	0	203,89	0	0	0	0	0	0	0
111,31	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	315,20	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31	23,40
16,60	3,32	3,17	14,34	2,87	2,73	35,08	2,48	2,36	10,70	2,14	2,04	9,24	1,85
1486,76	1490,08	1493,25	1507,59	1510,46	1513,19	1548,27	1550,75	1553,12	1563,82	1565,96	1568,00	1577,25	1579,10

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	87,91	0	0	87,91	0	0	87,91
0	0	0	0	0	0	0	0
23,40	111,31	23,40	23,40	111,31	23,40	23,40	111,31
1,76	7,99	1,60	1,52	6,90	1,38	1,32	5,96
1580,86	1588,84	1590,44	1591,97	1598,86	1600,25	1601,56	1607,52

VÍA EN PLACA RHEDA VARIACIÓN -10%	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costes de construcción	880,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costes de mantenimiento habitual	0	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
Renovación del carril y sujeciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Renovación completa del balasto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desguarnecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	880,02	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
VALOR ACTUAL DE COSTES	880,02	11,14	10,61	10,11	9,63	9,17	8,73	8,31	7,92	7,54	7,18
VALOR ACTUAL DE COSTES ACUMULADO	880,02	891,16	901,78	911,88	921,51	930,67	939,41	947,72	955,64	963,18	970,36

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
6,84	6,51	6,20	5,91	5,63	5,36	5,10	4,86	4,63	4,41	4,20	4,00	3,81	3,63
977,21	983,72	989,92	995,83	1001,46	1006,82	1011,93	1016,79	1021,42	1025,83	1030,03	1034,03	1037,84	1041,46

Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	Año 31	Año 32	Año 33	Año 34	Año 35	Año 36	Año 37	Año 38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	311,04	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	322,74	11,70	11,70	11,70
3,46	3,29	3,13	2,98	2,84	2,71	2,58	2,46	2,34	2,23	58,51	2,02	1,92	1,83
1044,92	1048,21	1051,34	1054,33	1057,17	1059,88	1062,46	1064,91	1067,25	1069,48	1127,99	1130,01	1131,93	1133,76

Año 39	Año 40	Año 41	Año 42	Año 43	Año 44	Año 45	Año 46	Año 47	Año 48	Año 49	Año 50	Año 51	Año 52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
1,75	1,66	1,58	1,51	1,44	1,37	1,30	1,24	1,18	1,12	1,07	1,02	0,97	0,93
1135,51	1137,17	1138,75	1140,26	1141,70	1143,06	1144,37	1145,61	1146,79	1147,91	1148,98	1150,00	1150,97	1151,90

Año 53	Año 54	Año 55	Año 56	Año 57	Año 58	Año 59	Año 60
0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
0,88	0,84	0,80	0,76	0,73	0,69	0,66	0,63
1152,78	1153,62	1154,42	1155,18	1155,91	1156,60	1157,25	1157,88